

Introdução

Nos últimos anos, a demanda por redes de capacidades cada vez mais altas vem aumentando. Esta demanda é justificada por vários fatores. Entre eles, o crescimento vertiginoso da Internet e da World Wide Web, que atraem mais e mais usuários a cada dia, consumindo grandes quantidades de largura de banda na transferência de arquivos, incluindo vídeos, músicas e imagens, além da utilização de aplicações em tempo real como vídeo conferência. Ao mesmo tempo, é cada vez mais comum que empresas utilizem intranets e extranets na realização de suas tarefas diárias. Indo um pouco mais além, a visão de uma futura era da informação prevê que não importará o local em que os dados estejam armazenados, pois eles devem estar acessíveis como se estivessem armazenados localmente. Essa visão só poderá ser concretizada se houver uma infra-estrutura composta de redes de enorme capacidade.

Para prover a enorme largura de banda e os novos serviços necessários para suportar o crescente tráfego IP (*Internet Protocol*), uma das tecnologias mais promissoras são as redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplex*).

Este trabalho abordará os diversos tipos de redes ópticas existentes, abordando as três gerações existentes, suas funções e componentes. Explorará também duas estratégias para tornar o transporte de tráfego IP mais eficiente em redes ópticas, tanto as atuais quanto para as futuras. A primeira é o *Generalized Multiprotocol Label Switching* (GMPLS), que é um plano de controle unificado para os diferentes tipos de rede no qual o tráfego IP é transportado. A outra estratégia é a comutação óptica de rajadas, que é um tipo de comutação que fica entre a comutação de circuitos e a comutação de pacotes e que apresenta diversos benefícios para o transporte de tráfego IP sobre redes WDM.

No primeiro capítulo deste trabalho, é feita uma introdução das redes ópticas, apresentando a primeira geração destas redes, que utilizavam fibras ópticas em substituição aos cabos metálicos, por serem um meio físico mais eficiente para telecomunicações. No final do capítulo, uma visão geral sobre o IP é dada.

Em seguida, no segundo capítulo, as redes WDM são exploradas. Num primeiro momento é apresentada a técnica de multiplexação por divisão por comprimento de onda (WDM). Logo depois, são introduzidas as redes ópticas de segunda geração, chamadas de redes *broadcast and select*. Em seguida, é a vez das redes ópticas de terceira geração, que

possuem capacidade de roteamento baseado no comprimento de onda no qual encontra-se a informação. Os nós que compõem estas redes são então abordados, assim como suas principais funcionalidades. Por fim, são mostradas as possíveis arquiteturas de camadas em uma rede WDM.

O terceiro capítulo explora o GMPLS, mostrando suas principais funções, os muitos benefícios que esta estratégia trará para o transporte IP em redes ópticas, e também alguns obstáculos que devem ser superados para sua implementação de fato.

No capítulo seguinte, é apresentada a técnica de comutação óptica de rajadas (OBS). A partir de variações já existentes de comutação de rajadas, é descrita uma proposta de um protocolo OBS [7] que mostra-se adequado para aplicação em redes ópticas WDM e para o transporte de tráfego IP.

Por fim, são feitas as considerações finais acerca dos temas apresentados neste trabalho.

Capítulo 1 – Introdução às Redes Ópticas

Neste capítulo é apresentada a primeira geração de redes ópticas, redes que utilizam fibras ópticas em enlaces ponto-a-ponto empregando apenas um comprimento de onda. O exemplo mais conhecido são as redes SONET/SDH. São introduzidos também os padrões IP e ATM.

1.1 - Redes Ópticas de Primeira Geração

Esta primeira geração de redes ópticas utiliza fibras ópticas para substituir os tradicionais cabos metálicos como meio de transmissão, possibilitando apenas a transmissão ponto-a-ponto entre nós fisicamente adjacentes, utilizando apenas um comprimento de onda, sendo as funções de processamento, comutação, roteamento e encaminhamento do tráfego realizadas no domínio eletrônico. Estas redes são usadas para transmissão a taxas maiores ou iguais a 100 Mb/s e distâncias superiores a poucos quilômetros, sendo a velocidade de transmissão limitada pela velocidade de processamento das interfaces eletrônicas. As redes de primeira geração são usadas principalmente na infra-estrutura das redes de telecomunicações.

Exemplos de redes ópticas de primeira geração incluem as redes SONET/SDH (*Synchronous Optical Network / Synchronous Digital Hierarchy*), as quais formam o núcleo da infra-estrutura de telecomunicações mundial. Incluem-se nesta geração também uma variedade de redes empresariais utilizadas para interligação de computadores e periféricos tais como ESCON (*Enterprise Serial Connection*), Canal de Fibra (*Fibre Channel*) e HIPPI (*High-Performance Parallel Interface*), e as redes FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*) bastante utilizadas em redes metropolitanas (MANs). Estas redes serão descritas nas próximas seções. São também introduzidas dois padrões de rede bastante difundidos: ATM e IP.

1.1.1 – Infra-estrutura Pública de Telecomunicações

O padrão SONET/SDH é adotado em grande parte do mundo para a multiplexação e transmissão de sinais de alta velocidade na infra-estrutura pública de telecomunicações. Na realidade, são dois padrões distintos: o SONET (*Synchronous Optical Network*) é utilizado principalmente nos Estados Unidos, enquanto o SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) vigora na Europa, Japão e Brasil. Entretanto, devido às suas enormes semelhanças, os dois padrões serão tratados indistintamente neste texto como padrão SONET/SDH.

Antes do SONET/SDH, havia a tecnologia PDH (*Plesyochronous Digital Hierarchy*), existente desde meados da década de 60. Na época, o foco principal era a multiplexação de circuitos digitais de voz. Um circuito analógico de voz com largura de banda de 4 kHz pode ser amostrado em 8 kHz e quantizado com 8 bits por amostra, o que leva a uma taxa de bits de 64 kb/s para um circuito digital de voz. Esse valor tornou-se um padrão amplamente aceito. A partir dele, são definidos os fluxos de velocidade mais alta. As taxas de transmissão PDH padronizadas estão relacionadas na Tabela 1.1. Vale destacar que há três padronizações distintas, e o Brasil adota o padrão europeu.

Nível	América do Norte	Europa	Japão
0	0,064 Mb/s	0,064 Mb/s	0,064 Mb/s
1	1,544 Mb/s	2,048 Mb/s	1,544 Mb/s
2	6,312 Mb/s	8,448 Mb/s	6,312 Mb/s
3	44,736 Mb/s	34,368 Mb/s	32,064 Mb/s
4	139,264 Mb/s	139,264 Mb/s	97,728 Mb/s

Tabela 1.1: Taxas de transmissão para PDH.

Para superar as limitações do PDH, começou a ser desenvolvido no final da década de 80 um novo padrão de transmissão e multiplexação. O padrão SONET/SDH incorpora vantagens em vários aspectos quando comparado ao padrão PDH. Dentre elas podem-se destacar:

- *Multiplexação:* Na hierarquia PDH, a extração de um canal de baixa velocidade de um feixe de 140 Mb/s, por exemplo, é complicada, devido ao processo de inserção de bits (“*bit stuffing*”) necessário para ajustar as diferenças de sincronismo entre os relógios dos diversos equipamentos. Para executar tal procedimento, faz-se necessário desmontar todo o quadro de alta velocidade, passando por todos os níveis intermediários até chegar no canal de baixa velocidade. No padrão SONET/SDH, todos os equipamentos trabalham com a mesma referência temporal, um relógio mestre, o que torna os canais múltiplos de uma mesma taxa básica independentemente do nível em que estão inseridos. A possibilidade de extração de canais de baixa velocidade sem a necessidade de desmontar todo o quadro de alta velocidade resulta em componentes como o ADM (*Add and Drop*

Multiplexer) e o DCS (*Digital Crossconnect*), que simplificam enormemente o projeto da arquitetura da rede.

- *Gerenciabilidade*: O padrão SONET/SDH incorpora uma extensa gama de informações de gerência, destinadas a monitorar a performance do tráfego, diferentemente do padrão PDH, onde este tipo de informação é escassa.
- *Interoperabilidade*: No padrão PDH, não havia padronização do enlace de transmissão, tornando difícil a interconexão de equipamentos de diferentes fabricantes através de um enlace. O padrão SONET/SDH soluciona este problema, definindo padrões para interfaces ópticas que permitem a interconexão de equipamentos de diferentes fabricantes. Infelizmente, ainda existem aspectos não padronizados, como os canais de comunicação para informações de supervisão e controle da rede.
- *Proteção*: Os mecanismos de proteção e restauração em presença de falhas são muito mais eficientes no padrão SONET/SDH. Em caso de uma falha simples, a restauração do serviço é feita em menos de 60 ms.

As taxas de transmissão SONET/SDH padronizadas estão relacionadas na Tabela 1.2 mostrada abaixo.

Sinal SONET	Sinal SDH	Taxa (Mb/s)
OC-1	—	51,84
OC-3	STM-1	155,52
OC-12	STM-4	622,08
OC-24	—	1244,16
OC-48	STM-16	2488,32
OC-92	STM-64	9953,28

Tabela 1.2: Taxas de transmissão SONET/SDH.

A topologia física mais comum adotada pelo padrão SONET/SDH é o anel, pois este apresenta um alto grau de disponibilidade de recursos na presença de falhas ainda que topologicamente simples, além de poder ser construído empregando exclusivamente ADMs.

Em termos de interfaces físicas, o padrão SONET/SDH pode, dependendo da distância e da velocidade de transmissão, utilizar tanto LEDs (*Light Emitting Diodes*) quanto lasers multimodo do tipo Fabry-Perot operando em 1310 nm ou ainda lasers monomodo do tipo DFB (*Distributed Feedback*) operando em 1550 nm. No canal podem ser empregadas tanto fibras multimodo quanto monomodo.

O tráfego transportado por esse tipo de rede não se resume estritamente ao serviço de telefonia pública. O padrão também é usado para o transporte de tráfego proveniente de redes ATM e IP.

Os custos de equipamentos SONET/SDH ainda são uma preocupação majoritária do projetista da rede, e quaisquer esforços no sentido diminuir a quantidade destes equipamentos são importantes.

1.1.2 – Interconexão de Computadores

Esse tipo de rede é muito mais presente no ambiente das redes corporativas. Ao contrário das redes SONET/SDH, tendem a utilizar componentes de baixo custo operando a taxas de bit modestas, normalmente funcionando sem mecanismos de proteção, dependendo da camada óptica para o fornecimento de proteção contra falhas.

A seguir, descreve-se brevemente três padrões de redes comumente empregados para interconectar computadores de grande e médio porte entre si e com seus periféricos tais como unidades controladoras de terminais, discos rígidos, impressoras e unidades de fita magnética.

1.1.2.1 – ESCON (*Enterprise Serial Connection*)

Trata-se de um padrão criado pela IBM (*International Business Machine*) com a finalidade de substituir as interfaces de entrada e saída de baixa velocidade a base de fios de cobre por interfaces ópticas. Essas interfaces estão altamente disseminadas em ambientes que utilizam *mainframes*, onde cada um desses computadores chega a possuir centenas de canais ESCON de entrada e saída, que podem ser ligados a outros *mainframes* ou a periféricos.

A taxa de transmissão por canal ESCON é de 200 Mb/s, com LED's operando em 1310 nm em fibras multimodo para distâncias menores que 3 km. Para distâncias maiores, que chegam a 20 km, utilizam-se lasers operando em associação com fibras monomodo. Um código de linha 8B10B é utilizado para evitar longas seqüências de bits iguais e alcançar o equilíbrio DC, isto é, número igual de 0s e 1s transmitidos.

1.1.2.2 – *Fiber Channel* (Canal de Fibra)

Trata-se de um padrão desenvolvido recentemente para ser utilizado nas mesmas aplicações que o ESCON, permitindo taxas de transmissão úteis de 200, 400 e 800 Mb/s. Na taxa mais alta, lasers multimodo operando a 1310 nm são utilizados mesmo em curtas distâncias. Da mesma forma que o ESCON, o *Fiber Channel* também utiliza uma codificação de linha 8B10B. Com a codificação, a taxa de bits realmente transmitida no canal é maior. No caso, a taxa de dados úteis de 800 Mb/s torna-se, após a codificação, 1062,5 Mb/s.

1.1.2.3 – HIPPI (*High Performance Parallel Interface*)

Esta é primariamente um padrão de interface paralela elétrica de entrada e saída a 800 Mb/s. Devido a variações de clock, a distância máxima é limitada a apenas 25 m. Para distâncias maiores, um novo padrão denominado *Serial HIPPI* foi desenvolvido, no qual os dados são serializados e transmitidos em fibra monomodo a 1,2 Gb/s. É amplamente utilizado em instalações com supercomputadores.

1.1.3 – Redes Metropolitanas

Um padrão bastante utilizado em redes metropolitanas é apresentado aqui, o FDDI.

1.1.3.1 – FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*)

Esse é um padrão para redes metropolitanas que opera em 100 Mb/s com fibras multimodo ou monomodo. Sua topologia física típica é em anel de duas fibras, e incorpora mecanismos de proteção similares aos da rede SONET/SDH. É uma extensão do bastante disseminado padrão *Token Ring* para redes locais, com uma maior velocidade e utilizando fibras ópticas.

O padrão foi desenvolvido para se obter uma implementação de baixo custo. Para distâncias entre nós de até 2 km, são utilizados LED's operando em 1310 nm, fibras multimodo e fotodiodos PIN na recepção. Pode-se estender a distância entre os nós para até 40 km, neste caso utilizando-se lasers e fibras monomodo.

O padrão FDDI utiliza uma codificação de linha 4B5B, para tentar obter algum equilíbrio DC, o que eleva a taxa de transmissão na fibra para 125 Mb/s. Essa codificação, porém, não atinge um equilíbrio DC perfeito.

1.2 – Visão Geral sobre os Padrões ATM e IP

Nesta seção, são introduzidos dois padrões de rede bastante difundidos: o ATM e o onipresente IP, que forma a base da Internet.

1.2.1 – ATM (*Asynchronous Transfer Mode*)

O modo de transferência assíncrono (ATM) é um padrão de conectividade que foi desenvolvido com vários objetivos, um deles sendo a constituição de uma plataforma tecnológica integrada para as redes de comunicação de dados e voz. Uma rede ATM usa pacotes ou células com um tamanho fixo de 53 bytes. Este tamanho de célula é um compromisso entre as exigências conflitantes das aplicações de voz e dados. Por um lado, é melhor utilizar pacotes maiores para transmissão de dados, pois o *overhead* é menor, e serviços de dados são relativamente tolerantes aos atrasos acarretados por retransmissões ou por filas ocasionalmente provocadas por congestionamento nos nós da rede. Por outro lado, um pacote menor favorece serviços de voz e vídeo, pois estes serviços podem suportar a ocorrência de alguns erros de bit, mas sua qualidade se degrada muito se houver atrasos de transmissão superiores a um limiar pequeno (algumas dezenas de ms), e especialmente se houver variações desses atrasos. Dos 53 bytes da célula ATM, pelo menos 5 bytes constituem o cabeçalho, que é o *overhead* necessário para carregar as informações, (como, por exemplo, o destino do pacote). O padrão ATM pode ser utilizado em todos os tipos de redes, desde redes locais (LANs) até WANs (*Wide-Area Network*).

Uma das principais vantagens do ATM é sua capacidade de prover garantias de qualidade de serviço (*quality-of-service* [QoS]) para as aplicações, tais como largura de banda e atraso, mesmo utilizando a multiplexação estatística das células de modo a tornar mais eficiente o uso da largura de banda do enlace. Esta tecnologia consegue este feito através do uso de informações obtidas *a priori* a respeito das características da conexão, como por exemplo, o valor de pico e o valor médio de largura de banda requeridos. O padrão ATM utiliza também um controle de admissão para bloquear novas conexões quando necessário, para satisfazer exigências de garantia de qualidade de serviço. Vários padrões para a camada física são especificados para ATM. Esta escala inicia em 25,6 Mb/s para cabos de cobre de par trançado e estende-se até 622,08 Mb/s para fibras ópticas monomodo.

Outra vantagem do ATM é a utilização de comutação mesmo em ambientes de rede local, onde outras tecnologias LAN como *ethernet* e *token ring* utilizam um meio compartilhado como uma barra ou anel. A comutação torna mais fácil o provimento de

garantias de qualidade de serviço em redes ATM do que em redes utilizando estas outras tecnologias. O tamanho fixo das células ATM também facilita o desenvolvimento de comutadores de alta velocidade e baixo custo.

O emprego da tecnologia ATM está sendo mais lento que o esperado por várias razões. Uma delas é que o protocolo IP, que será estudado em seguida, continua sendo suficiente para muitas aplicações e também está evoluindo no sentido de prover os mesmos tipos de funcionalidades que o ATM. Uma outra razão é a relativa lentidão no desenvolvimento de seus padrões. Além disso, na área das redes locais, o ATM está enfrentando uma competição com outros padrões emergentes, como as versões *Ethernet* de 100 Mb/s e 1 Gb/s.

1.2.2 – IP (*Internet Protocol*)

O protocolo IP é certamente a tecnologia de rede mais difundida. O crescimento da Internet é a maior prova disso. Este protocolo é capaz de trabalhar sobre uma grande variedade de camadas inferiores (camadas de enlace de dados), o que é uma das principais razões de seu sucesso. Ele pode ser utilizado em redes locais *ethernet* e *token ring* e em redes metropolitanas baseadas em FDDI. Pode ser também utilizado sobre redes ATM e SONET/SDH.

Em comparação com o ATM, o IP tradicional fornece apenas simples serviços de datagrama para suas camadas superiores, não havendo nesse protocolo a noção de conexão. Não há também garantias de qualidade de serviço, como no ATM. Apesar da aparente superioridade do ATM, o crescimento do IP é tão grande que a padronização ATM define interfaces para que o IP possa operar como sua camada imediatamente superior. Quando o IP foi desenvolvido tinha como objetivo apenas a interligação de redes que transportam dados, sem preocupações com aplicações em tempo real, como tráfego de voz ou vídeo. Por isso, o IP utiliza pacotes de tamanho variável, o que é eficiente para o aproveitamento dos recursos da rede, porém esse recurso pode produzir atrasos inaceitáveis em aplicações multimídia. Outra problema do IP é a ausência da noção de conexão. Com isso, pacotes IP que fazem parte de um mesmo fluxo podem tomar caminhos diferentes para chegar a um mesmo destino (pacotes IP são roteados de maneira independente). A consequência disso é que os pacotes IP deste fluxo podem sofrer atrasos diferentes durante seu percurso, o que torna mais difícil ainda sua utilização em aplicações multimídia.

Um dos mais conhecidos protocolos da camada de transporte que atua diretamente sobre o IP é o TCP (*Transmission Control Protocol*). Por esta razão, tais redes são conhecidas comumente por redes TCP/IP.

Com o rápido crescimento dos serviços baseados na *Internet*, tanto os usuários quanto os operadores das redes têm sentido a necessidade de algumas garantias de qualidade de serviço, o que gerou um grande esforço entre os desenvolvedores do padrão IP nesse sentido. O maior exemplo deste esforço foi a criação do MPLS (*Multiprotocol Label Switching*), que serve para acelerar o encaminhamento dos pacotes IP em roteadores IP e ATM, e pontes *ethernet*. Atualmente, este conjunto de protocolos está sendo expandido para suportar os dispositivos utilizados em redes ópticas, dando origem ao GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*). Ambos serão discutido em um capítulo posterior deste trabalho.

Apenas uma visão geral do protocolo IP foi dada aqui. Vários outros aspectos importantes deste protocolo serão ainda discutidos, sendo introduzidos quando necessário ao longo deste trabalho.

Capítulo 2 – Redes Ópticas WDM

Este capítulo inicia com uma introdução à técnica de multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM). A seguir, são apresentadas as redes ópticas de segunda geração (broadcast and select), e as redes de terceira geração, que possuem capacidade de roteamento baseado em comprimento de onda. Posteriormente, é mostrado o projeto e a funcionalidade dos nós em redes WDM. Por fim, uma breve discussão sobre as possíveis arquiteturas de camadas em redes WDM.

2.1 – Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda

Teoricamente, uma fibra óptica possui uma largura de banda extremamente alta (por volta de 25 THz [terahertz], ou seja, 25 milhões de megahertz) na janela de baixa atenuação de 1550 nm. Este valor equivale a mais de mil vezes a banda de rádio total da Terra. No entanto, as taxas de transmissão atingidas atualmente estão na casa de alguns gigabytes por segundo, limitação causada pela velocidade de processamento eletrônico (o chamado “gargalo” eletrônico). Dessa forma, torna-se complicado o aproveitamento total da largura de banda oferecida por um único comprimento de onda de alta capacidade em uma única fibra óptica. Os recentes avanços nas taxas de transmissão de dados, ultrapassando a taxa de terabits por segundo são resultado de dois grandes desenvolvimentos: a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*wavelength division multiplexing* [WDM]), que é um método utilizado para enviar vários feixes de luz com diferentes comprimentos de onda no núcleo de uma fibra óptica; e o amplificador de fibra dopada com érbio (*erbium-doped fiber amplifier* [EDFA]), que amplifica sinais ópticos em diversos comprimentos de onda ao mesmo tempo, independente de sua velocidade ou esquema de modulação [2].

De forma conceitual, o WDM é muito parecido com a multiplexação por divisão de frequência (FDM). Em WDM, múltiplos sinais de informação (equivalentes, por exemplo, a sinais eletrônicos provenientes de usuários finais) modulam sinais ópticos com diferentes comprimentos de onda, e os sinais modulados resultantes são combinados e transmitidos em uma mesma fibra óptica, como ilustra a figura 2.1. Para multiplexação e demultiplexação podem ser utilizados prismas e grades de difração, que são componentes passivos e, por isso, bastante confiáveis. Além disso, a portadora de cada canal WDM possui uma frequência um milhão de vezes maior que um canal FDM (THz contra MHz). Assim, dentro de cada canal

WDM pode ser utilizado FDM para dividir a largura de banda do canal em muitos canais de rádio frequência, em diferentes frequências. Isto é chamado de multiplexação por subportadora.

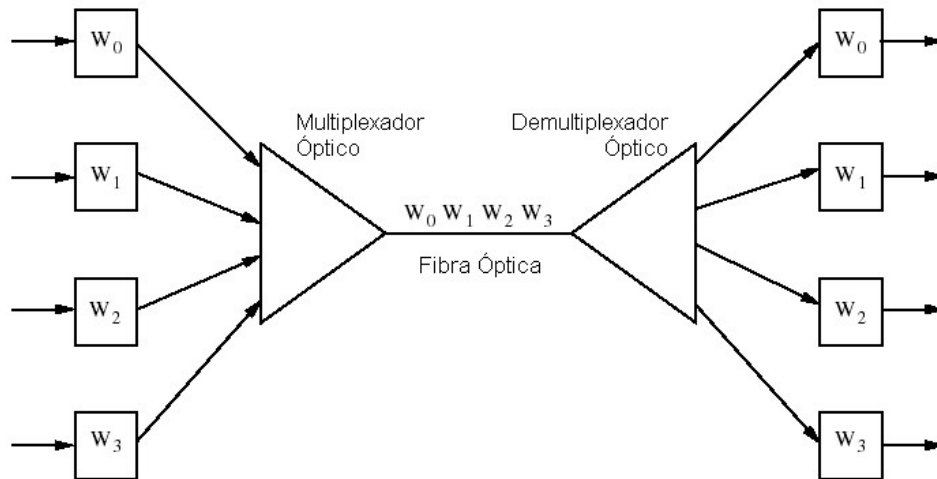


Figura 2.1: Multiplexação por divisão em comprimento de onda.

Um comprimento de onda também pode ser compartilhado por vários nós em uma rede através da multiplexação por divisão no tempo (TDM) realizada eletronicamente. É importante notar que a técnica WDM ajuda a minimizar o gargalo eletrônico, dividindo o espectro de transmissão óptico em canais de comprimento de ondas coexistindo em uma única fibra, e cada canal desse pode agir como um canal de comunicação independente trabalhando a velocidade eletrônica máxima. O grande atrativo do WDM é a possibilidade de grande expansão da largura de banda disponível em um enlace sem a necessidade de instalação de fibras ópticas adicionais. Por exemplo, para transmitir 40 Gb/s através de 600 km utilizando um sistema tradicional, 16 pares de fibras ópticas (40/2,5) e 224 regeneradores eletrônicos $([600/40-1]16)$ são necessários, considerando um distanciamento típico de 40 km entre cada regeneração. Por outro lado, um sistema WDM com 16 canais precisa apenas de um par de fibra e 4 amplificadores ópticos $(600/120-1)$, com os amplificadores sendo necessários a cada 120 km. Como avanço do WDM, surgiu a técnica DWDM (*dense WDM*) que aumenta o número de canais em uma fibra óptica diminuindo o espaçamento entre os canais (espaçamentos típicos variam entre 0,4 nm a 4 nm [50 GHz a 500 GHz]) [2]. As técnicas WDM e DWDM serão tratadas apenas como WDM ao longo do trabalho.

Foram os amplificadores ópticos EDFA que possibilitaram a aplicação comercial de sistemas WDM, realizando a amplificação de todos os comprimentos de onda ao mesmo tempo, independente de sua taxa de bits, esquema de modulação ou níveis de potência. Antes destes amplificadores ópticos, as perdas ópticas eram compensadas por regeneradores eletrônicos distantes um dos outros algumas dezenas de quilômetros, que precisam realizar conversões dos sinais ópticos para elétricos, e depois para o domínio óptico outra vez (conversão O/E/O). Esse processo prejudica a transparência do sistema, que será abordada em seção posterior deste capítulo.

2.2 – Redes Ópticas de Segunda Geração

As redes ópticas de segunda geração são as redes *broadcast and select*. Para estabelecer a conectividade entre seus nós, essas redes utilizam topologias físicas que possibilitam que o sinal óptico enviado por um nó, em qualquer comprimento de onda, seja recebido por todos os outros. Estas redes não possuem capacidade de roteamento baseado em comprimento de onda.

Dentre as diversas topologias físicas disponíveis para esse tipo de rede, as mais difundidas são o barramento e a estrela, que serão comentadas na próxima seção.

Neste ponto, cabe diferenciar a topologia física da topologia de caminhos físicos, também conhecida como topologia virtual. A primeira refere-se à parte física propriamente dita, os componentes tais como fibras ópticas e acopladores que interligam os nós da rede. Já a segunda pode ser representada por um grafo que descreve a trajetória da informação por todos os nós intermediários entre o nó origem e o nó destino, para cada par origem-destino.

A distinção está ilustrada na Figura 2.2, onde podem ser visualizadas a topologia física e a correspondente topologia virtual de uma rede óptica.

A topologia virtual pode ser entendida como a configuração de rede vista pela camada cliente da óptica. A configuração física em anel, para este arranjo de caminhos ópticos, é vista como uma topologia unifilar pela camada cliente (por exemplo, uma rede ATM).

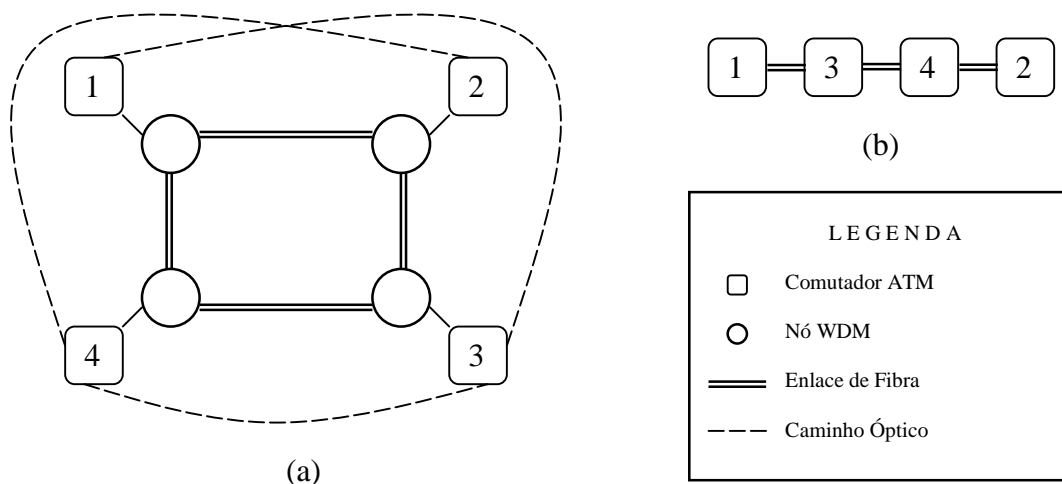


Figura 2.2: (a) Topologia física da rede, com os caminhos ópticos estabelecidos mostrados. (b) Topologia virtual, aquela vista pela camada cliente da camada óptica.

Como nas redes de segunda geração os comprimentos de onda são transmitidos para todos os nós (*broadcast*), a detecção de um sinal em um dado nó deve empregar um dispositivo que extraia um comprimento de onda ao mesmo tempo em que rejeita os outros (*select*). Atualmente essa detecção é feita com o uso de filtros ópticos de alta seletividade. Essa filtragem possui a vantagem de rejeitar a ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) fora da faixa do canal desejado em redes que se utilizam de amplificadores ópticos. Cada nó neste tipo de rede pode possuir um ou mais transmissores ópticos fixos ou sintonizáveis e um ou mais receptores ópticos fixos ou sintonizáveis.

A utilização de uma topologia física do tipo *broadcast* provê conectividade física total entre todos os nós, o que não significa que essa conectividade se transporte para a topologia de caminhos físicos. Fatores como a necessidade de sintonizar um canal de cada vez nos nós, bem como as limitações tecnológicas atuais na rapidez da mudança de sintonia de um canal para outro impedem essa transferência. Uma vez que a topologia física seja do tipo *broadcast*, a topologia de caminhos físicos apresentará um ramo direcionado para cada par de nós, nos quais o transmissor da origem do ramo e o receptor do destino do ramo estejam sintonizados no mesmo comprimento de onda. Um comprimento de onda só poderá ser utilizado por um único par origem-destino (um ramo na topologia de caminhos físicos), de modo a evitar colisões. Essa restrição define como $N.(N-1)$ o número de comprimentos de onda necessários para estabelecer conectividade total na topologia de caminhos físicos em uma rede com N nós, o que implica na não escalabilidade deste tipo de rede.

Com a utilização de uma técnica denominada *multihopping* é possível obter conectividade entre todos os nós da rede mesmo na presença de limitações em relação ao número de comprimentos de onda. Esta técnica consiste no reenvio de informações recebidas por nós intermediários através de outro ramo (diferente daquele no qual a informação foi recebida) da topologia de caminhos físicos até chegar seu destino final. Cada envio nesta técnica é chamado de *hop*, e a rede é então dita *multihop*. Para encaminhar as informações para seu destino final, um nó intermediário precisa ler ao menos o endereço de destino da informação (contido no cabeçalho de um pacote IP, por exemplo). No atual estado tecnológico, esse processamento é feito eletronicamente, o que implica em perda de transparência em redes *multihop*.

2.2.1 - Aspectos da Topologia Física

Dentre as diversas topologias capazes de implementar meios de transmissão do tipo *broadcast*, as mais difundidas são a estrela e o barramento, mostrados nas Figuras 2.3 e 2.4, respectivamente. Ambas as topologias fazem uso de acopladores ópticos.

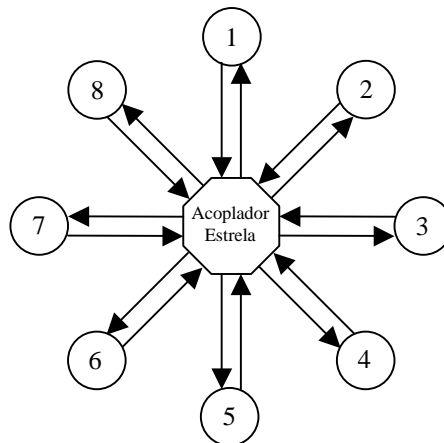


Figura 2.3: Rede óptica com topologia física em estrela.

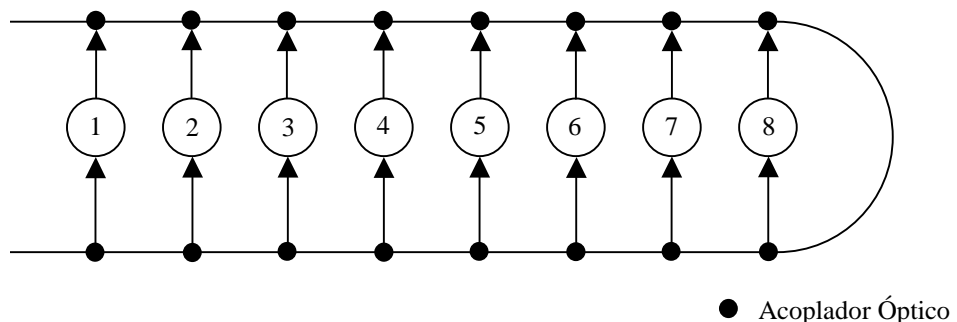


Figura 2.4: Rede óptica com topologia física em barramento.

Um acoplador 2×2 é um dispositivo passivo e recíproco de quatro portos (quadripolo), que pode ser considerado como um elemento básico na construção de acopladores mais sofisticados. A Figura 2.5 mostra a representação básica de um acoplador 2×2, com os portos de entrada e saída discriminados.

Existem dois tipos de perdas que estarão sempre presentes em acopladores:

- Perdas *intrínsecas*, de uma saída qualquer em relação à entrada, que se referem ao compartilhamento da potência entre as saídas;
- Perdas *extrínsecas*, ou perdas em excesso, que se referem à energia dissipada ou espalhada pelo dispositivo. Este tipo de perda é nula em acopladores ideais.

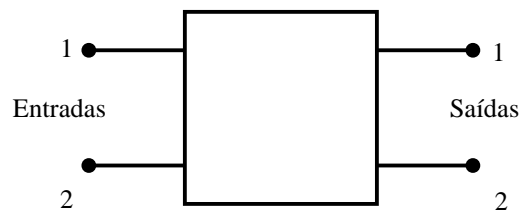


Figura 2.5: Representação de um acoplador óptico 2×2.

Pode-se relacionar os sinais de entrada e saída de um acoplador 2×2 através de uma matriz de espalhamento cuja forma canônica é escrita a seguir, onde o elemento (m,n) denota a transmissividade do porto m para o porto n.

$$S = \sqrt{\beta} \begin{pmatrix} \sqrt{1-\alpha} & j\sqrt{\alpha} \\ j\sqrt{\alpha} & \sqrt{1-\alpha} \end{pmatrix}$$

Na matriz acima, α é um número entre 0 e 1, conhecido como *fator de acoplamento*, e β é o fator de perda extrínseca. No caso de acopladores ideais, $\beta = 1$. São descritos a seguir três tipos de acopladores utilizados comumente em redes *broadcast and select*:

- Acoplador de 3 dB:

Quando o fator de acoplamento α equivale a $\frac{1}{2}$, o acoplador é dito simétrico (não confundir com a simetria física do dispositivo) ou de 3 dB. A matriz de espalhamento para o acoplador de 3 dB fica então:

$$S = \sqrt{\frac{\beta}{2}} \begin{pmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{pmatrix}$$

No caso de acopladores ideais, $\beta = 1$, e a matriz de espalhamento indica que sinais aplicados em qualquer uma das entradas do dispositivo aparecerão nas duas saídas com 70,7% de sua amplitude (o que corresponde à metade da potência) e fases ortogonais entre si.

- Acoplador de Passagem.

No caso de barramentos ópticos, os acopladores ópticos utilizados devem ser construídos de tal forma que apenas uma pequena fração da potência óptica seja derivada para cada receptor, permanecendo a maior parte desta no barramento para alimentar os receptores subsequentes. Neste caso, é desejável um fator de acoplamento variável.

- Acoplador Estrela

Caso o número de nós N seja uma potência de 2, é possível montar um acoplador estrela $N \times N$ fazendo uso de $\frac{N}{2} \log_2 N$ acopladores de 3 dB, de modo que a potência óptica de cada entrada seja repartida igualmente entre todas as saídas, não levando em conta as perdas extrínsecas. A figura 2.6 mostra um arranjo que usa 12 acopladores de 3 dB para constituir um acoplador estrela 8×8 .

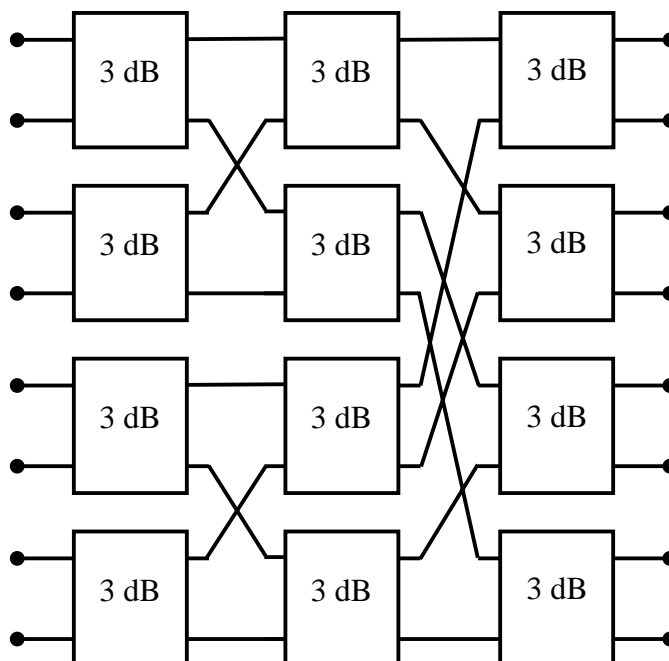


Figura 2.6: Acoplador estrela 8×8 montado a partir de 12 acopladores 2×2 .

Para a realização da comparação da eficiência do emprego da topologia em estrela em relação ao barramento, deve-se avaliar a somatória das perdas intrínsecas e extrínsecas

proporcionadas pelas duas topologias. Para o caso da topologia em estrela, no acoplador mostrado na Figura 2.6, um sinal deve compulsoriamente passar por $\log_2 N$ acopladores de 3 dB para ir de uma entrada qualquer a uma saída qualquer. Essa condição leva aos seguintes valores para as perdas, expressos em dB:

- Perdas intrínsecas: $3 \cdot \log_2 N = 10 \cdot \log_{10} N$;
- Perdas extrínsecas: $(-10 \cdot \log_{10} \beta) \cdot \log_2 N$.

As perdas totais para a topologia em estrela serão dadas pela adição das duas modalidades calculadas acima. Vale destacar que para esta topologia tanto as perdas intrínsecas quanto as extrínsecas variam logarithmicamente com N .

$$P_{\text{Totais}} (\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} N - (\log_2 N) \cdot 10 \cdot \log_{10} \beta \quad (\text{topologia em estrela}).$$

Para a topologia em barramento, será avaliada a perda do pior caso. Referindo-se à Figura 2.4 e assumindo o emprego de acopladores de passagem idênticos, o pior caso se dá quando o transmissor do nó 1 deseja comunicar-se com o receptor do nó 2. Nessa situação, tem-se em dB:

- Perdas intrínsecas: $-10 \cdot \log_{10} [\alpha^2 (1 - \alpha)^{2N-3}]$;
- Perdas extrínsecas: $-10 \cdot \log_{10} [\beta^{2N-1}]$.

Chamando de R o logaritmando da expressão das perdas intrínsecas, a derivada parcial $\frac{\partial R}{\partial \alpha} = 0$ pode ser feita para encontrar um valor ótimo de α que minimiza o valor desta modalidade de perdas. Esse valor de α é dado por:

$$\alpha_{\text{ótimo}} = \frac{2}{2N-1} \cong \frac{1}{N} .$$

Substituindo esse valor na expressão das perdas intrínsecas e lembrando que $\left(1 - \frac{1}{N}\right)^N \rightarrow e$ para N suficientemente grande, tem-se, em dB:

- Perdas intrínsecas: $-10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{e \cdot N} \right)^2$.

O valor total das perdas na topologia em barramento é dado pela expressão a seguir:

$$P_{\text{totais}} (\text{dB}) = 8,7 + 20 \log_{10} N - (2N-1) \cdot 10 \cdot \log_{10} \beta \quad (\text{topologia em barramento}).$$

Através da análise desta expressão, fica claro que as perdas intrínsecas são maiores que na topologia estrela, e mais importante, as perdas extrínsecas variam linearmente com N . Neste exemplo, a topologia estrela é a melhor escolha. Em situações diferentes (levando-se amplificadores ópticos em conta, por exemplo), a topologia estrela continua mostrando-se

melhor na maioria dos casos. Mesmo nos poucos casos em que é superada pela topologia em barramento, a diferença de desempenho é baixa [1].

2.2.2 - Protocolos de Controle de Acesso ao Meio

Nas redes de segunda geração, assumindo que cada nó tenha um par de fibras ópticas, uma para a transmissão e outra para recepção, e que existam W comprimentos de onda, os nós da rede podem transmitir e receber informações em qualquer um dos canais disponíveis, através da utilização de um ou mais transmissores sintonizáveis e/ou receptores sintonizáveis. Entretanto, se dois nós transmitirem simultaneamente no mesmo comprimento de onda, devido a natureza *broadcast* da rede, os sinais colidirão e ambos serão perdidos ou corrompidos. Considere ainda o caso onde dois nós transmitem em comprimentos de onda diferentes, porém para um mesmo nó destino. Caso o nó destino possua apenas um receptor sintonizável, ele poderá selecionar somente uma das transmissões. Neste caso as duas transmissões contenderão.

Para solucionar contenções e evitar, ou ao menos minimizar, as colisões prejudiciais, é necessário a existência de alguma coordenação entre os vários nós da rede. Um mecanismo que proveja esta coordenação é chamado de protocolo de controle de acesso ao meio (*Media Access Control* [MAC]). O principal objetivo no desenvolvimento destes protocolos é explorar eficientemente a enorme largura de banda das fibras ópticas de modo a satisfazer a crescente demanda pela transmissão de informações sob restrições de recursos da rede e restrições impostas nas informações transmitidas.

Os critérios para avaliação de eficiência destes protocolos é o atraso dos pacotes e a vazão (*throughput*). O *throughput* de uma rede refere-se a fração da capacidade de transmissão desta rede que corresponde a transmissão de dados úteis, ou seja, dados que chegam ao seu destino final livres de colisões ou contenções.

A seguir, serão comentados brevemente protocolos MAC projetados para redes WDM com topologia em estrela, com foco para os protocolos utilizados em arquiteturas *single-hop*. De acordo com o serviço prestado para a informação transmitida, estes protocolos MAC podem ser divididos em três categorias: protocolos MAC para a transmissão de pacotes, para a transmissão de mensagens de tamanho variável e protocolos MAC para transmissão de mensagens em tempo real [3].

Protocolos MAC para a Transmissão de Pacotes

Os protocolos MAC para a transmissão de pacotes em redes WDM *single-hop* com topologia em estrela são chamados também de protocolos “legados” (*legacy protocols*), pois são dedicados à transmissão de pacotes de tamanho fixo. Em uma rede *single hop*, é necessário uma significativa coordenação dinâmica entre os nós, de forma a acessarem os recursos da rede. De acordo com os esquemas de coordenação, os protocolos MAC podem ser adicionalmente classificados em duas subcategorias.

Sem transmissão prévia de protocolos de coordenação

Estes protocolos não necessitam de canais para a transmissão prévia de coordenação. Todos os canais de transmissão são alocados antecipadamente aos nós transmissores ou acessados por estes através de disputa. Os protocolos desta categoria podem ainda ser classificados como alocação fixa, protocolos de alocação fixa parcial e protocolos de acesso aleatório tendo como representantes o TDM ponderado (*weighted time-division-multiplexing*), o protocolo de alocação de destino (*destination allocation-DA*) e o *slotted-ALOHA*, respectivamente.

Transmissão prévia de protocolos de coordenação

Nestes protocolos os canais de transmissão são agrupados em canais de controle e canais de dados. Estes protocolos podem ainda ser classificados em duas categorias que referem-se à maneira que o canal de controle é acessado. Neste caso, tem-se os protocolos de acesso aleatório, que incluem o ALOHA, *slotted-ALOHA* e o CSMA, e na outra categoria os protocolos de reserva, tendo como principal representante o DT-WDMA (*dynamic time wavelength division multiple access*), onde um canal é reservado como o de controle e é acessado somente de uma maneira TDM pré-determinada.

Protocolos MAC para Transmissão de Mensagens de Tamanho Variável

As principais vantagens de transmitir mensagens de tamanho variável sobre redes WDM são:

- Para uma aplicação, as métricas de desempenho das suas unidades de dados (*application data unit* - ADU) são medidas mais pertinentes do que aquelas especificadas pelos pacotes individuais (protocolos do item anterior);
- Este enfoque ajusta-se perfeitamente na atual tendência de transportar tráfego IP sobre redes WDM;

- Fragmentação e remontagem de mensagens não são necessárias.

Existem dois protocolos conhecidos como FatMAC e LiteMAC, que tentam combinar as técnicas de reserva e pré-alocação para agendar a transmissão de mensagens de tamanho variável sem colisão. O protocolo FatMAC baseia-se em um enfoque híbrido que reserva acesso a canais alocados previamente através de pacotes de controle. A reserva especifica o destino, o canal e o tamanho da mensagem da próxima transmissão de dados. No caso do protocolo LiteMAC, além de usar mecanismos especiais de agendamento, cada nó é equipado com um transmissor e um receptor sintonizável, sendo portanto mais flexível que o FatMAC, que usa receptores fixos em cada nó. Entretanto, ambos protocolos têm habilidade para transmitir mensagens de tamanho variável sem colisão, através do agendamento.

Protocolos MAC para Serviços em Tempo Real

Uma função importante das redes de computadores de alta velocidade, assim como, das redes WDM, é prover serviços em tempo real para aplicações, como vídeo e voz, que possuem restrições em relação a atrasos. A maioria dos protocolos MAC que provêem serviços de tempo real em redes WDM com topologia em estrela, são protocolos com reserva baseada em pré-coordenação. De acordo com o tipo de serviço prestado às mensagens transmitidas, os protocolos MAC para serviços de tempo real podem ser classificados em três tipos: protocolos para serviço de melhor esforço, protocolos com serviço determinístico garantido e protocolos com serviço estatístico garantido [3].

2.3 – Redes Ópticas de Terceira Geração

Esta seção aborda a terceira geração de redes ópticas, aquelas que possuem capacidade de roteamento baseado no comprimento de onda em que a informação se encontra. Estas redes possuem muitas vantagens em relação às gerações anteriores, e muitas vezes carregam tráfego originado por estas redes.

De maneira geral, a topologia de uma rede com roteamento de comprimento de onda consiste de nós do tipo *wavelength crossconnect* (WXC) ou *optical crossconnect* (OXC) interconectados por enlaces de fibras. A rede deve prover caminhos ópticos (*lightpaths*) para atender as requisições entre pares de nós, cada qual utilizando um comprimento de onda

diferente em um determinado enlace. Os caminhos ópticos podem ser interpretados como vias de grande largura de banda por onde trafegam dados a altas velocidades. Os caminhos ópticos são formados alocando-se um comprimento de onda em cada enlace no caminho entre dois nós, e claramente não se pode ter dois caminhos ópticos utilizando o mesmo comprimento de onda em um mesmo enlace.

Cada enlace suporta um determinado número de comprimentos de onda trafegando na fibra óptica. O número total de comprimentos de onda suportados por cada enlace depende principalmente de restrições tecnológicas dos componentes, tais como largura de banda de amplificadores ópticos ou características de filtros ópticos, e cresce à medida que a tecnologia se desenvolve. No momento, é possível falar em algumas dezenas de comprimentos de onda trafegando na mesma fibra.

Nessas redes, pode-se trabalhar com o conceito de *topologia virtual*: cada caminho óptico provido pela camada óptica é visto pelas camadas superiores como um enlace totalmente independente, e que pode carregar dados em formatos distintos dos outros caminhos ópticos.

A figura 2.7 ilustra uma rede física simples, na qual os caminhos de luz (indicados por linhas pontilhadas e tracejadas) foram configurados para permitir a comunicação entre nós que não estão diretamente conectados por um enlace de fibra. A topologia virtual provê um certo grau de independência com relação a topologia física, pois diferentes topologias virtuais podem ser configuradas, o que nos permite escolher a topologia que resultará num melhor desempenho a rede dado suas condições, como por exemplo o tráfego médio entre os nós.

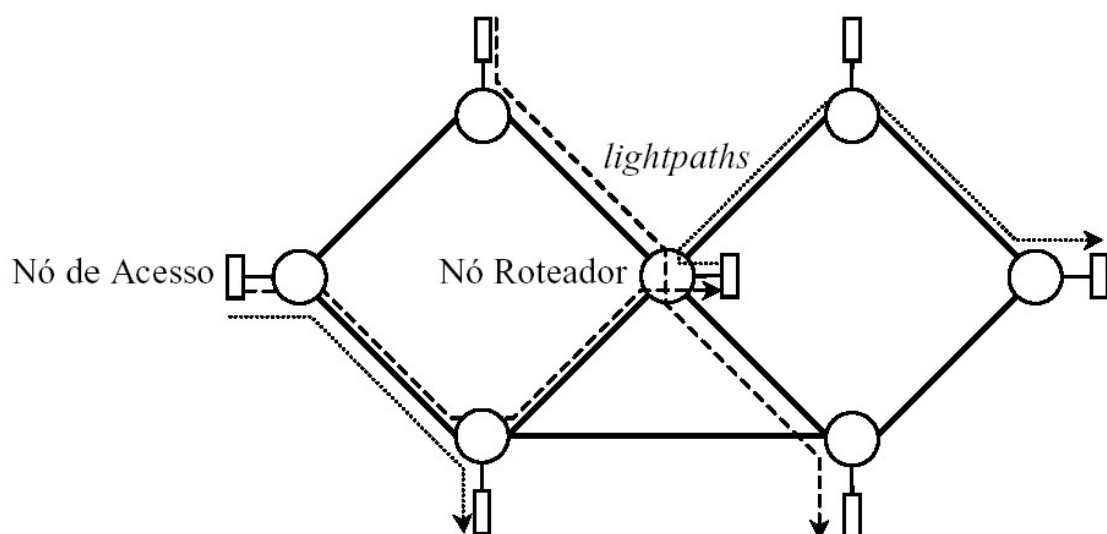


Figura 2.7: Rede WDM com roteamento por comprimento de onda.

Além da capacidade de roteamento e topologia virtual provida pela camada óptica, as redes com roteamento por comprimento de onda apresentam as seguintes características:

- *Transparência:* Está relacionada à capacidade dos caminhos ópticos de transportar dados em uma variedade de taxas, protocolos e formatos, suportando deste modo várias camadas superiores diferentes operando ao mesmo tempo. Alguns caminhos ópticos podem carregar o tráfego SONET/SDH enquanto outros podem carregar células ATM diretamente ou pacotes IP.
- *Reuso de comprimento de onda:* Mesmo com a limitação de comprimentos de onda em uma rede, eles podem ser reutilizados espacialmente, desde que não haja dois caminhos ópticos distintos utilizando o mesmo comprimento de onda em um mesmo enlace. Isto é ilustrado na figura 2.7, onde dois caminhos ópticos separados estão utilizando um mesmo comprimento de onda. Essa reutilização aumenta enormemente a capacidade da rede, uma vez que o número de caminhos ópticos que a rede pode prover passa a ser muito maior que o número de comprimentos de onda disponíveis, contribuindo desta forma para tornar as redes deste tipo mais escaláveis.
- *Confiabilidade:* A rede pode ser configurada para que, em caso de falhas em um ou mais enlaces, os caminhos ópticos podem ser re-roteados automaticamente por rotas alternativas, impedindo que a comunicação cesse, tornando a rede bem mais confiável.
- *Comutação de circuitos (Circuit Switching):* Existe a flexibilidade necessária para ativar ou desativar caminhos ópticos fornecidos pela camada óptica de acordo com as necessidades impostas pela demanda. Trata-se de um processo análogo ao estabelecimento ou terminação de circuitos em uma rede telefônica, exceto pelo fato que a frequência de estabelecimento ou terminação tende a ser muito menor no caso da rede óptica do que no caso da rede telefônica, por exemplo, dada a enorme diferença de largura de banda alocada. No estágio atual da tecnologia, não existe comutação de pacotes na camada óptica, apesar de estudos nesse sentido. A comutação de pacotes nestas redes é realizada eletronicamente por camadas superiores, como o IP.

2.4 – Projeto de Nós

2.4.1 – Nós da Rede WDM

Os elementos chaves nas redes ópticas WDM de terceira geração são os *wavelength crossconnect* (WXC). A Figura 2.8 mostra o diagrama de blocos funcionais de um WXC. Os nós possuem uma estrutura básica composta de portos de tronco, que os conectam a outros nós. Assume-se que esses portos sejam bidirecionais, ligados a um par de fibras ópticas unidirecionais cada. No caso de haver apenas dois portos de tronco, o nó é denominado WADM (*Wavelength Add and Drop Multiplexer*), ou simplesmente ADM. Os nós possuem também portos locais, que podem ser ópticos ou elétricos, e que funcionam como fonte ou sorvedouro de tráfego. Os caminhos ópticos são originados ou terminados em portos locais. Finalmente, há associados a estes nós elementos gerenciadores da rede, responsáveis pelo controle e gerenciamento do estado das chaves e conversores de comprimentos de onda presentes no nó.

Os componentes básicos para a construção de nós deste tipo são os multiplexadores e demultiplexadores passivos de comprimento de onda, chaves e/ou conversores de comprimento de onda. Estes últimos são dispositivos capazes de receber um sinal em um comprimento de onda e entregar na saída o mesmo sinal em um comprimento de onda diferente.

Os nós WXC podem apresentar diversas funcionalidades, que serão discutidas nas seções subsequentes.

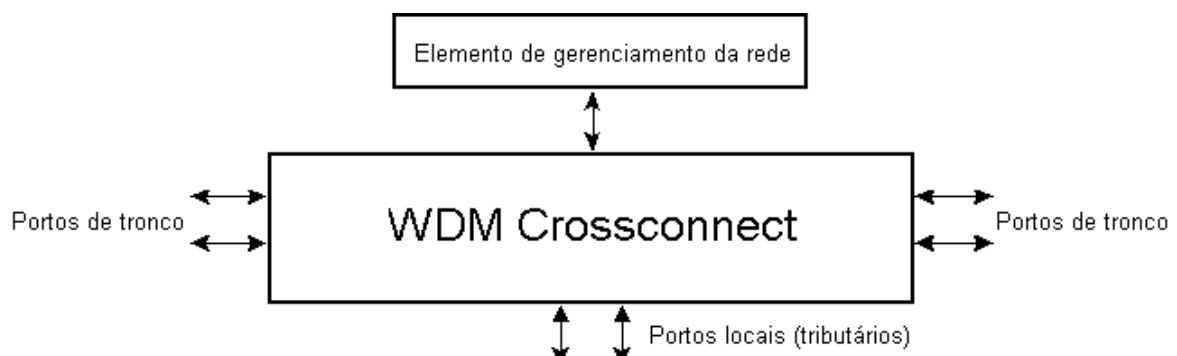


Figura 2.8: Diagrama de blocos de um WXC.

2.4.2 - Grau de Conversão de Comprimento de Onda

A introdução da capacidade de conversão de comprimentos de onda desempenha um papel muito importante no aumento da eficiência da utilização dos comprimentos de onda disponíveis na rede, reduzindo o número de bloqueios na requisição de caminhos ópticos. Pode ser útil também quando um caminho óptico precisa atravessar domínios administrados por operadores diferentes que não utilizam a mesma política de atribuição de comprimentos de ondas, ou na conexão de equipamentos de empresas diferentes, que utilizam comprimentos de onda incompatíveis.

No caso da rede não dispuser de capacidade de conversão de comprimento de onda em seus nós, um caminho óptico deve ter o mesmo comprimento de onda alocado ao longo de todos os enlaces desde o nó origem até o nó destino. Já com capacidade de conversão, esse caminho óptico pode possuir vários comprimentos de onda designados nos enlaces entre o nó de origem e de destino.

A figura 2.9 mostra quatro diferentes tipos de conversão de comprimento de onda que podem ser implementadas em um nó do tipo WADM. Para facilitar o exemplo, a conversão é mostrada em apenas um sentido. Os conversores utilizados nestas implementações são do tipo *entrada-fixa*, *saída-fixa*, que como o próprio nome diz recebem o sinal em um dado comprimento de onda fixo e o converte em um comprimento de onda na saída também fixo. Pode-se construir nós com a mesma funcionalidade empregando-se para tanto um número menor conversores de comprimentos de onda do tipo *entrada-variável*, *saída-fixa*.

A capacidade de conversão de um nó pode ser aferida por um fator de conversão d , variando entre 1 e W . Um comprimento de onda na entrada pode ser convertido em d comprimentos de onda diferentes na saída do nó. Se d igual a 1, temos capacidade *fixa* de conversão de comprimento de onda. Um caso especial de d igual a 1 refere-se à situação onde não há capacidade alguma de conversão (entrada e saída iguais). Se qualquer comprimento de onda pode ser convertido em qualquer outro pelo nó, ou seja, d igual a W , diz-se que o nó possui capacidade *completa* de conversão.

Em termos de implementação, a capacidade completa de conversão é muito difícil de ser realizada de modo completamente óptico, enquanto a capacidade limitada de conversão pode ser implementada mais facilmente.

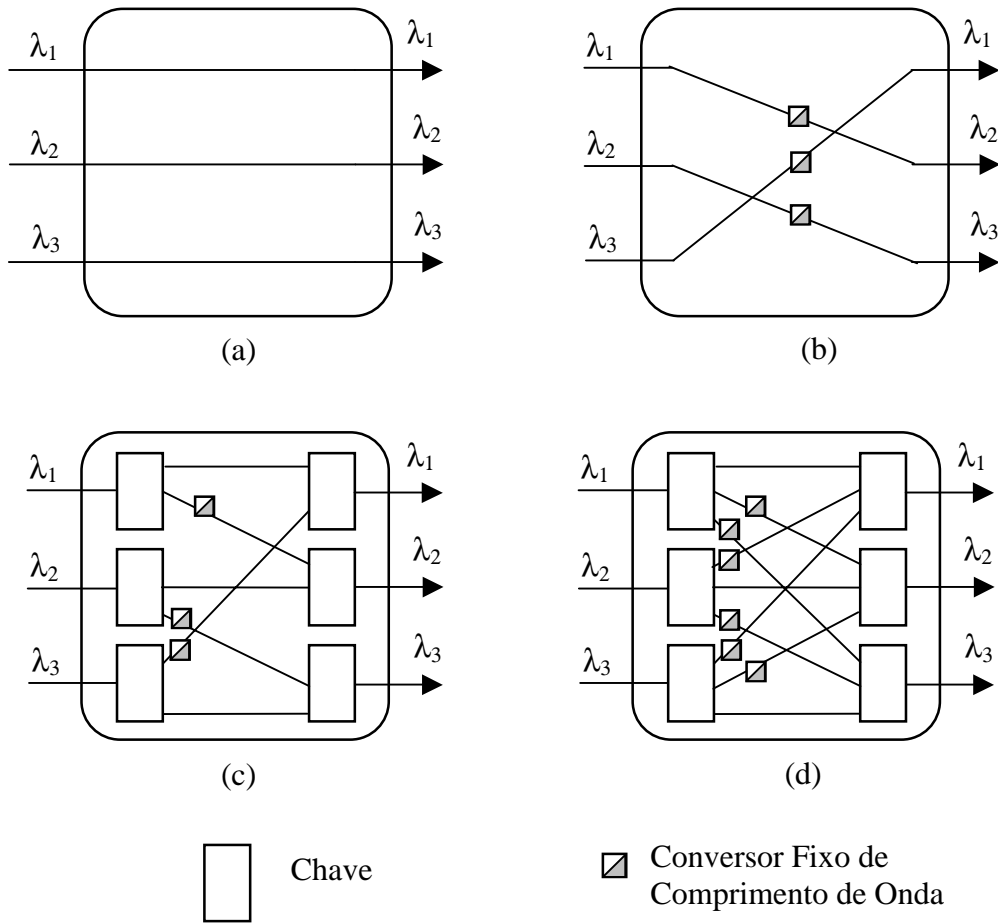


Figura 2.9: Diferentes tipos de conversão de comprimento de onda implementados em um WADM: a) ausência de conversão; b) conversão fixa; c) conversão limitada e d) conversão completa. Os ports locais não são mostrados.

Existe também uma grande correlação entre a quantidade de chaveamento necessário em um nó e o grau de conversão de comprimento de onda, uma vez que um certo grau de conversão é alcançado com a utilização de uma combinação de chaves e conversores de comprimentos de onda. Portanto, como é de se esperar, um grau menor de conversão implica em nós empregando uma menor quantidade de chaves e conversores.

Vale destacar também que a capacidade limitada de conversão, apesar de diminuir consideravelmente a complexidade do *hardware* dos nós, aumenta em muito a complexidade do *software* de gerência e controle da rede quando comparada à capacidade completa de conversão, visto que esse *software* deve lidar com restrições adicionais ao executar o roteamento dos caminhos ópticos.

2.4.3 - Redes de Múltiplas Fibras

Em muitas situações, as redes podem utilizar múltiplos pares de fibra entre nós para prover capacidades mais altas. A presença de múltiplos pares de fibra equivale à presença de um único par, porém com alguma capacidade limitada de conversão de comprimento de onda nos nós.

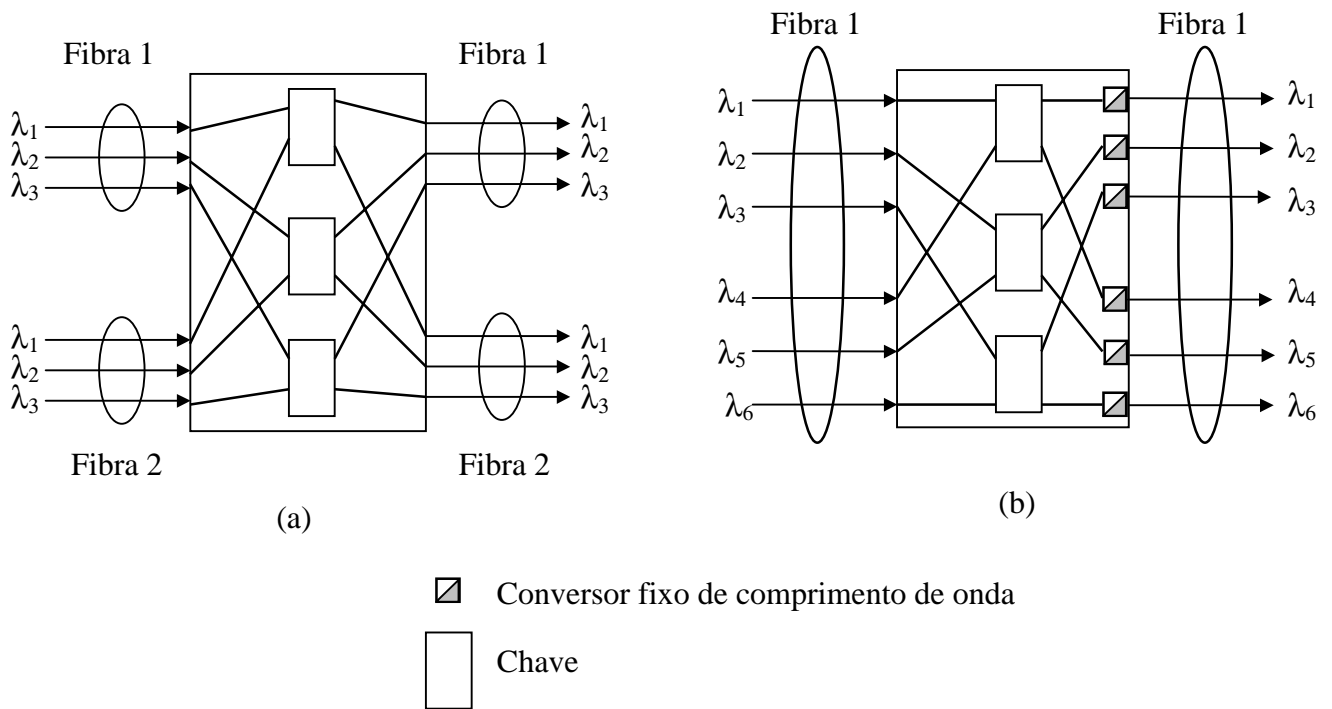


Figura 2.10: Equivalência entre redes com múltiplos pares de fibras e redes com um único par de fibras porém com capacidade limitada de conversão de comprimento de onda.

A Figura 2.10 ilustra essa propriedade. Na situação (a), tem-se dois pares de fibras entre nós e nenhuma capacidade de conversão de comprimento de onda. Cada par de fibra carrega W comprimentos de onda, e em cada nó os sinais de um par de fibras podem ser comutados para o outro par. Na situação (b), tem-se apenas um par de fibras entre nós carregando $2W$ comprimentos de onda e nós com capacidade limitada de conversão (com $d=2$). Redes que empregam esses dois tipos de nós são equivalentes em termos de suas capacidades de suportar tráfego. Quaisquer caminhos ópticos suportados em (a) são também suportados em (b). Entretanto, nós do tipo mostrado em (b) tendem a ser mais caros por empregarem conversores de comprimento de onda em sua estrutura interna.

2.4.4 - Grau de Transparência

O nível de transparência de um nó é um fator variável. Uma implementação completamente óptica oferece um alto grau de transparência, ou seja, insensibilidade a dados analógicos ou digitais, taxas de transmissão, formato da modulação, etc. Já uma implementação consistindo de *crossconnects* SONET eletrônicos, por exemplo, não oferece quase nenhuma transparência.

O grau de transparência oferecido por uma implementação eletrônica depende do tipo de regeneração do sinal empregado dentro do nó. Se a implementação for completamente analógica, pode oferecer quase o mesmo nível de transparência que a implementação óptica. Se a implementação for digital, não há como transportar dados analógicos.

Existem basicamente três tipos de regeneração de dados digitais. O padrão é chamado de regeneração com retemporização e reformatação dos pulsos, ou 3R. Nesta técnica, o *bit clock* é extraído do sinal, e o sinal recebe novo *clock*. Dessa maneira, são criadas cópias “novas” do sinal a cada regeneração sofrida, permitindo que o sinal atravessasse um grande número de regeneradores. Contudo a transparência a taxas de bits e formatos de quadros é totalmente perdida, por causa da retemporização. Regeneradores de *clock* variável podem oferecer transparência a taxas de bits limitada.

O segundo método de regeneração é a reformatação do sinal sem a retemporização, chamado 2R. Oferece transparência a taxas de bits sem, no entanto, suportar dados analógicos ou modulações diferentes. O número de regenerações possíveis é limitado pelo *jitter* que vai sendo acumulado ao longo das regenerações, principalmente em altas taxas de bit.

A última forma de regeneração é a 1R, onde o sinal é simplesmente recebido e retransmitido, sem retemporização ou reformatação. Suporta dados analógicos, porém permite um número de regenerações muito menor que os outros dois métodos.

2.4.5 - Comparação dos Nós: Crossconnect Óptico vs. Crossconnect Eletrônico

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação qualitativa entre o desempenho de um *crossconnect* totalmente óptico e outro híbrido eletrônico/óptico [1]:

	<i>WXC Óptico</i>	<i>WXC Eletrônico</i>
Transparência	Sim	Difícil
Conversão de Comprimento de Onda	Difícil	Fácil
Taxas de Transmissão	$> 10 \text{ Gb/s}$	$\leq 2,5 \text{ Gb/s}$
Tamanho do WXC	Pequeno	Grande
Projeto da Camada Física	Difícil	Fácil
Monitoramento	Limitado	Extenso
Componentes Necessários:		
Mux / Demux	Sim	Sim
Chaves Ópticas	Sim	Não
Chaves Elétricas	Não	Sim
Transmissores e Receptores	Não	Sim
Conversores de Comprimento de Onda	Talvez	Não

Tabela 2.1: Comparação entre nós empregando WXC totalmente ópticos versus nós empregando WXC híbridos ópticos/eletrônicos.

Algumas considerações devem ser levadas em conta na escolha entre WXCs ópticos ou eletrônicos:

- Um WXC óptico pode ser completamente transparente à taxa de transmissão, formato de modulação e protocolo utilizado pelo sinal, o que é bastante difícil de se conseguir com um WXC eletrônico, principalmente em taxas maiores que algumas centenas de Mb/s.
- Por outro lado, com a utilização de WXCs eletrônicos, é muito mais fácil realizar a conversão de comprimentos de onda quando necessário.
- WXCs ópticos praticamente não são afetados por taxas de bits, não tendo tantas limitações de velocidade em suas portas quanto os eletrônicos.
- Comutadores eletrônicos são atualmente mais baratos que os ópticos e podem ser integrados mais facilmente.
- Os WXCs ópticos tornam o projeto do sistema de transmissão muito mais difícil, pois o sinal permanece no domínio óptico da origem até o destino, passando por vários nós intermediários.

- Falta de capacidade de monitoramento de sinais em WXC's ópticos.
- A confiabilidade dos comutadores óptico precisa ainda ser comprovada, já que trata-se de uma tecnologia nova e ainda não extensivamente utilizada.

2.5 - Classificação das Redes WDM

De acordo com a funcionalidade dos nós, pode-se classificar as redes ópticas em estáticas ou reconfiguráveis:

- *Estáticas:* Não possuem quaisquer chaves ou conversores dinâmicos dentro de seus nós. O padrão de roteamento dos nós é fixo e não pode ser alterado.
- *Reconfiguráveis:* Possuem chaves e/ou conversores dinâmicos, permitindo a capacidade de mudança nos padrões de roteamento entre os nós.

A principal diferença entre esses dois tipos de rede é o fato de que o conjunto de caminhos ópticos que pode ser estabelecido entre usuários é fixo em uma rede estática, mas pode ser alterado em uma rede reconfigurável, mudando-se o estado das chaves e dos conversores nos nós WXC.

O projeto de uma rede estática é apropriado se existe um conjunto fixo de requisições de caminhos ópticos que deverão ser suportados. Entretanto, na grande maioria das redes, o conjunto de requisições de caminhos ópticos não é conhecido antecipadamente ou varia com o tempo.

As redes estáticas, apesar de mais baratas e confiáveis (devido a utilização de componentes passivos), precisam de um grande número de comprimentos de onda para suportar padrões de tráfego com variabilidade limitada. Pode-se reduzir substancialmente o número de comprimentos de onda necessários com a incorporação de chaves em uma rede.

2.6 – Arquitetura de Camadas em Redes WDM

As redes que formam o *backbone* da Internet atualmente consistem de roteadores IP de alta capacidade conectados por enlaces ponto-a-ponto de fibra óptica. O tráfego é transportado entre os roteadores por enlaces de alta velocidade (alguns Gb/s), obtidos com a utilização das tecnologias SONET ou ATM-sobre-SONET. Os roteadores do *backbone* usam tecnologia IP-sobre-SONET ou IP-sobre-ATM-sobre-SONET para rotear o tráfego de pacotes IP na rede

backbone. A maioria das redes de transporte utilizadas como *backbone* baseadas no padrão SONET oferecem interfaces de dados nas taxas OC-3 ou OC-12. O crescimento da utilização da Internet, e o conseqüente aumento da demanda de tráfego chegou num ponto que tornou cada vez mais comum a exigência de interfaces de dados com taxas OC-48 ou mais. A atualização da infra-estrutura de transporte SONET existente para oferecer essa taxa mais altas não é desejável, pois não é nada prático o incremento de capacidade de suas interfaces de dados. Este incremento também não é viável economicamente. Uma solução viável e com custo aceitável é o uso da tecnologia WDM nas redes *backbone*. Numa rede deste tipo (IP sobre WDM, por exemplo), os nós da rede são interconectados por enlaces de fibra óptica WDM (onde cada enlace transporta múltiplos sinais, um em cada comprimento de onda), e os nós empregam WXC's e elementos de processamento eletrônico (podem ser roteadores IP, comutadores ATM ou um sistema SONET). A figura 2.11 ilustra um exemplo típico de rede *backbone* utilizando WDM.

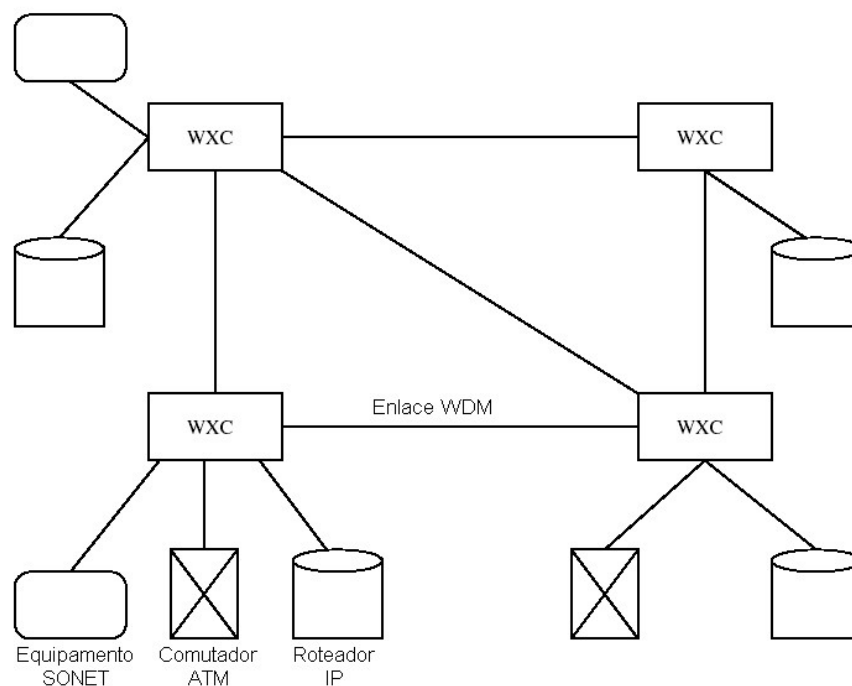


Figura 2.11: Rede *backbone* WDM.

Nesta rede, quaisquer dois roteadores IP podem ser interconectados por um caminho óptico. Se dois nós não estão conectados diretamente por um caminho óptico, eles podem comunicar-se utilizando o enfoque *multi-hop*, isto é, há a comutação eletrônica de pacotes nos

nós intermediários ao longo do caminho. Essa comutação eletrônica pode ser provida por roteadores IP, comutadores ATM ou equipamentos SONET.

Uma rede de transporte baseada em tecnologia WDM pode ser, de maneira geral, decomposta em três camadas: uma camada de meio físico (*physical media layer*), uma camada óptica (*optical layer*) e uma camada cliente (*client layer*). Esta estrutura de camadas é ilustrada pela figura 2.12. A utilização da tecnologia WDM em redes introduz a camada óptica entre a camada física (mais baixa) e a camada cliente superior (IP, ATM, SONET). A camada óptica é constituída por um conjunto de caminhos ópticos, que formam uma topologia virtual. Serviços de comutação de circuitos transparentes a protocolos são oferecidos pela camada óptica aos diversos clientes que formam a camada cliente. Isto é possível porque os caminhos ópticos são transparentes a taxas de bits de dados e protocolos utilizados. A camada óptica tem a capacidade de atender diferentes clientes simultaneamente. Por exemplo, alguns dos caminhos ópticos em uma rede podem ser empregados para transportar pacotes IP, enquanto outros podem ser utilizados para transportar dados provenientes de equipamentos SONET. A camada óptica também pode ser capaz de oferecer esquemas de proteção, com o re-roteamento de caminhos ópticos em casos de falha, aumentando assim o grau de confiabilidade da rede.

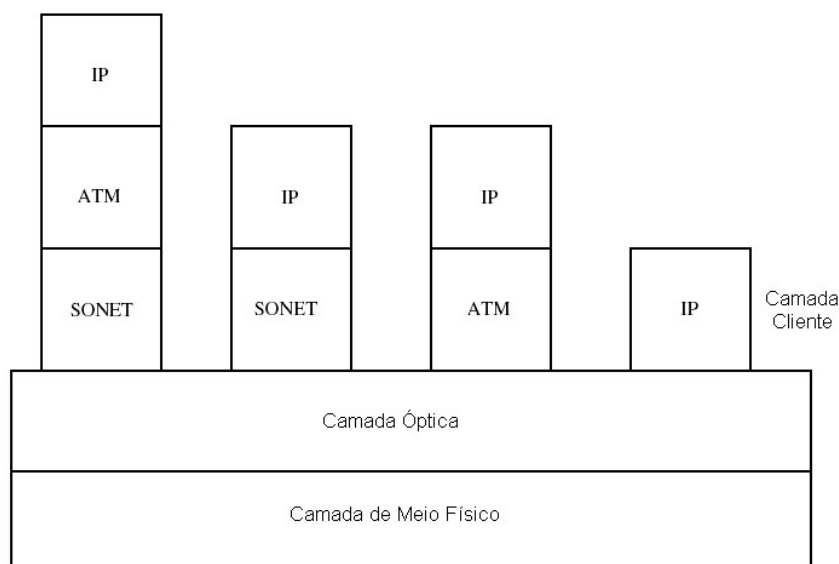


Figura 2.12: Possíveis camadas em uma rede óptica WDM.

De acordo com a recomendação G.872 do ITU-T (International Telecommunications Union–Telecommunication Standardization Sector), a camada óptica pode ser ainda decomposta em três subcamadas: uma camada de canal óptico (*optical channel layer*), uma

camada de seção de multiplexação óptica (*optical multiplex section layer*) e uma camada de seção de transmissão óptica (*optical transmission section layer*). A função da camada de canal óptico é prover canais ópticos (caminhos ópticos) fim-a-fim para transportar de forma transparente os dados do cliente. A camada de seção de multiplexação óptica é responsável por agregar os sinais de múltiplos comprimentos de onda. A camada de seção de transmissão óptica responde pela transmissão dos sinais ópticos em diferentes tipos de mídia óptica (fibra monomodo ou multimodo, por exemplo) [2].

Como foi visto no decorrer deste capítulo, são inúmeras as vantagens oferecidas pelas redes ópticas WDM. Certamente elas serão componentes fundamentais para suportar o intenso crescimento da Internet. O aumento dos recursos proporcionados por estas redes vem acompanhado pelo aumento de complexidade em seu gerenciamento, principalmente pela variedade de tráfegos que serão transportados sobre elas, como mostrado na figura 2.12. No próximo capítulo, um plano de controle para gerenciar de forma eficiente estas redes é examinado.

Capítulo 3 – Generalized Multiprotocol Label Switching

O assunto abordado neste capítulo é o Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS), um plano de controle único para os diversos tipos de rede no qual o tráfego IP é transportado atualmente. Primeiro são feitas considerações gerais sobre o GMPLS, e logo em seguida é dada uma visão geral sobre o conjunto de protocolos que o originou, o MPLS. Depois, é feita uma introdução ao GMPLS e a análise de suas diversas funcionalidades. Por fim, alguns dos obstáculos a serem superados para sua implantação são expostos.

3.1 – Considerações Gerais

O desenvolvimento das redes WDM, com o surgimento de elementos como crossconnects ópticos (OXC), aumentou de forma considerável a capacidade das redes ópticas. Atualmente existem diversos protocolos rodando sobre estas redes. O protocolo IP (Internet Protocol) é um deles, porém ele não é transportado diretamente sobre a camada óptica. As redes atuais transportam pacotes IP sobre ATM-SONET-WDM ou IP sobre SONET-WDM. Esse enfoque torna bastante complexo o aproveitamento dos recursos proporcionados pela tecnologia WDM. Dessa forma, é interessante a criação de uma estrutura que seja capaz de gerenciar as diferentes camadas existentes nas redes atuais, e permitir que desenvolvimentos posteriores na tecnologia de redes ópticas possam ser incorporados facilmente. O GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching) é uma estratégia que tem como objetivo estabelecer um plano de controle único para dispositivos que realizam comutação de pacotes, no domínio do tempo, do espaço e de comprimento de onda, que irá tornar possível a provisão dinâmica de recursos e proporcionará melhor capacidade de sobrevivência da rede com o uso de técnicas de proteção e restauração. A adoção do GMPLS como plano de controle tornará mais eficiente a utilização de recursos nas redes atuais e mais suave a transição para as futuras redes.

O GMPLS é uma extensão da arquitetura MPLS (Multiprotocol Label Switching). O MPLS tem como premissa básica acelerar o encaminhamento (*forwarding*) de pacotes e prover engenharia de tráfego em redes IP (Internet Protocol). Para conseguir isto, a operação sem conexão em uma rede IP torna-se parecida com a de uma rede baseada a conexão onde o caminho entre a origem e destino são pré-calculados com base em especificações dos operadores. Para conseguir a aceleração do encaminhamento de pacotes, um equipamento

MPLS usa rótulos (*labels*) ao invés de conferência do endereço para determinar o próximo *hop* do pacote recebido. Para prover engenharia de tráfego, são utilizadas tabelas representando os níveis de qualidade de serviço (QoS) que a rede pode suportar. Os rótulos e as tabelas são utilizadas em conjunto para estabelecer um caminho fim-a-fim chamado de caminho comutado por rótulo (*Label Switched Path* – LSP). Os protocolos utilizados pelo MPLS incluem os tradicionais protocolos de roteamento IP como, por exemplo, OSPF (*Open Shortest Path First*) e IS-IS (*Intermediate System to Intermediate System*), e extensões a protocolos de sinalização já existentes como o protocolo de reserva de recursos (RSVP – *ReSource ReserVation Protocol*) e o protocolo de distribuição de rótulos baseado em restrições de roteamento (CR-LDP – *Constraint-based Routing – Label Distribution Protocol*).

3.2 – Visão Geral sobre o MPLS

O MPLS foi criado como uma extensão dos protocolos IP para acelerar o esquema de encaminhamento utilizado em roteadores IP. Até então, os roteadores utilizavam complexas e demoradas rotinas de consulta a tabelas de rotas e conferência de endereços para determinar o próximo *hop* de um pacote recebido, baseando-se primariamente em seu endereço de destino. A adoção do MPLS torna esta tarefa bem mais simples, pois baseia a decisão de encaminhamento em um simples rótulo (*label*). Outra importante característica do MPLS é a habilidade de colocar o tráfego IP dentro de um caminho definido através da rede, o que não era possível até então. Dessa forma, pode-se garantir largura de banda e outros serviços diferenciados dependendo da aplicação utilizada pelo usuário. Isso possibilita que redes baseadas em IP/MPLS possam prover qualidade de serviço (QoS), oferecendo serviços como alocação de largura de banda baseada em prioridade, garantia de largura de banda, e serviços de preempção.

Para cada tipo específico de serviço é criada uma tabela de equivalência de classes de encaminhamento (FEC – *Forwarding Equivalence Class*), que representa um grupo de fluxos que possuem as mesmas exigências de engenharia de tráfego. Para cada FEC é especificado um rótulo específico. Na entrada de uma rede MPLS, os pacotes IP que estão chegando são examinados e um roteador de rótulos de borda (*Label Edge Router* [LER]) atribui rótulos aos pacotes. Os pacotes rotulados são então encaminhados através de um caminho comutado por rótulo (LSP), onde cada roteador comutado por rótulo (LSR – *Label Switching Router*) toma

sua decisão baseado no rótulo do pacote. Não é necessário que o LSR leia o cabeçalho do pacote IP para encaminhá-lo para uma porta de saída, o que agiliza bastante o roteamento, diminuindo a quantidade de processamento necessário na rede. Um LSR simplesmente remove o rótulo preexistente e aplica um novo para o próximo *hop*. A base de informações de rótulos fornece um rótulo de saída para ser aplicado no pacote e qual a interface de saída, baseado na informação da interface de entrada ou do rótulo de entrada.

Para estabelecer caminhos comutados por rótulo determinados por engenharia de tráfego é utilizada sinalização provida pelo protocolo de distribuição de rótulos (LDP – *Label Distribution Protocol*) que está presente em todos os nós MPLS. Há vários protocolos de distribuição de rótulos que podem ser utilizados. Os dois mais populares são o protocolo de reserva de recursos com extensões de engenharia de tráfego (RSVP-TE) e o protocolo de distribuição de rótulos baseado em restrições de roteamento (CR-LDP). O RSVP-TE é uma versão estendida do protocolo de reserva de recursos (RSVP) com o objetivo de superpor e distribuir rótulos em suas mensagens e proporcionar capacidade de engenharia de tráfego. O CR-LDP foi feito especificamente para este propósito. A figura 3.1 mostra o fluxo de distribuição de rótulos promovido pelo LER que recebe o fluxo de dados (neste caso, LER2), enquanto o fluxo do caminho comutado por rótulo LSP é o inverso [5].

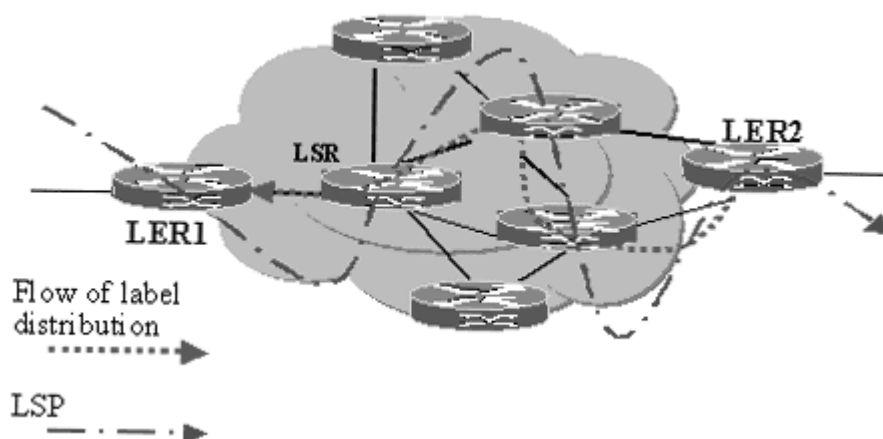


Figura 3.1: Rede baseada em MPLS [5].

Os protocolos IP de roteamento de estado de enlaces (*IP link-state routing protocols*) também são estendidos pela estrutura MPLS. Estes protocolos proporcionam coordenação em tempo real da topologia da rede, incluindo os atributos de cada enlace. As extensões MPLS aos protocolos OSPF e IS-IS permitem aos nós não apenas trocarem informações sobre a topologia, mas também informações sobre recursos e informações sobre políticas, como

políticas para largura de banda disponível, endereços IP e balanceamento de carga. Estas informações são utilizadas para calcular caminhos otimizados para caminhos comutados por rótulos com o uso de algoritmos de roteamento baseado em restrições, e permite que decisões complexas de engenharia de tráfego sejam tomadas de forma automatizada quando da seleção de rotas através de uma rede.

3.3 – Introdução ao GMPLS

Nos últimos anos, surgiram algumas propostas de estruturas para otimizar o transporte IP através de redes WDM baseadas em MPLS. Estas propostas sugeriam utilizar o MPLS, estendendo-o para que ele pudesse ser o plano de controle para *crossconnects* ópticos, tornando-os capazes de realizar algumas das funções presentes em equipamentos MPLS tradicionais.

A partir dessas propostas, o IETF (*Internet Engineering Task Force*) resolveu estender a funcionalidade do MPLS, criando o GMPLS. Esta nova estrutura passa a abranger dispositivos que comutam no domínio do tempo (por exemplo, SDH/SONET, PDH, G. 709), comprimentos de onda (lambdas) e no domínio do espaço (porta ou fibra óptica de entrada para porta ou fibra óptica de saída). Dessa forma, uma rede baseada em GMPLS é capaz de encontrar e prover um caminho ótimo baseado em requerimentos de tráfego do usuário para um fluxo que, por exemplo, começa em uma rede IP, é transportado por SONET, e é então chaveado em um determinado comprimento de onda dentro de uma determinada fibra óptica.

O principal foco do GMPLS é no plano de controle para essas diferentes camadas, pois cada uma delas pode usar planos de dados ou de encaminhamento fisicamente diferentes. São abordados no GMPLS tanto a parte de sinalização quanto de roteamento do plano de controle.

3.4 – Tipos de Comutação

As interfaces em roteadores comutados por rótulo (LSR) podem ser subdivididos nas seguintes categorias [4]:

- *Packet Switch Capable* (PSC): São interfaces que reconhecem os limites de um pacote e podem tomar decisões de encaminhamento com base no conteúdo do cabeçalho do pacote. Os exemplos incluem interfaces em roteadores que

encaminham dados baseados em cabeçalhos IP e interfaces em roteadores capazes de encaminhar dados baseados no cabeçalho “*shim*” MPLS.

- *Layer-2 Switch Capable* (L2SC): Interfaces capazes de reconhecer os limites de quadros/células e podem encaminhar dados baseados no conteúdo do cabeçalho de quadros/células. Os exemplos incluem pontes Ethernet que encaminham dados com base no conteúdo do cabeçalho MAC e interfaces em ATM-LSRs que encaminham dados baseado em ATM VPI/VCI (*Virtual Path/Connection Identifier*).
- *Time-Division Multiplex Capable* (TDM): Interfaces que encaminham dados com base no seu *slot* de tempo em um ciclo repetitivo. Estão incluídas nesse tipo de interface SDH/SONET *Digital Cross-connects* (DCS), *Terminal Multiplexer* (TM), e *Add-Drop Multiplexer* (ADM).
- *Lambda Switch Capable* (LSC): Interfaces que encaminham dados baseado no comprimento de onda no qual os dados são recebidos. Exemplos de tais interfaces são os cross-connects ópticos (OXC) ou fotônicos (PXC) capazes de operar a nível de comprimento de onda individual. Dispositivos capazes de operar a nível de grupo de comprimentos de onda (*waveband*) também estão incluídos.
- *Fiber-Switch Capable* (FSC): São as interfaces que encaminham dados baseado na posição que os dados ocupam no espaço físico real. Exemplos são OXCs e PXCs capazes de operar a nível de uma única ou múltiplas fibras ópticas.

Na especificação original do MPLS, apenas os dois primeiros tipos de dispositivos eram suportados. Nota-se, então, que as extensões foram promovidas pelo GMPLS para abranger os dispositivos utilizados em redes ópticas.

O maior desafio para um plano de controle que suporte todos estes dispositivos é o estabelecimento, manutenção e gerenciamento de caminhos que permita que o plano de dados transporte de maneira eficiente os dados de seus usuários. De sua origem até seu destino, o fluxo de dados de um usuário final passará por diversos tipos diferentes de redes. Por exemplo, pode começar em uma rede de acesso que agrega fluxos de múltiplos usuários, para então alimentar uma rede metropolitana baseada em SONET/SDH ou ATM, que também agrega diversos fluxos de redes de borda (*edge*) para alimentar uma rede de longa distância que utiliza comprimentos de onda para transportar os fluxos de múltiplas redes metropolitanas agregadas. Um exemplo deste tipo de rede é mostrado na figura 3.2.

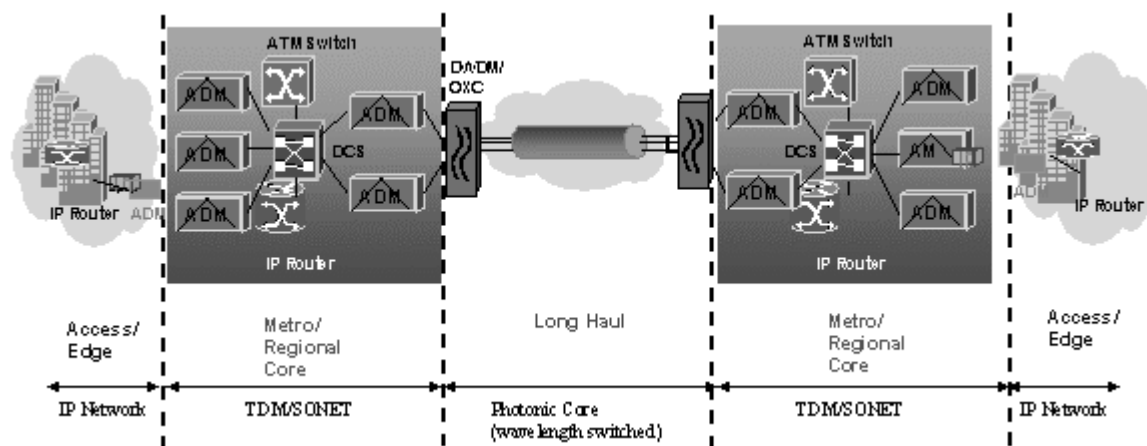


Figura 3.2: Exemplo de rede heterogênea que transporta tráfego para usuários finais [5].

3.5 – Conjunto de Protocolos Utilizados no GMPLS

Os protocolos utilizados no GMPLS são extensões do MPLS. São os protocolos de sinalização (RSVP-TE, CR-LDP) e de roteamento (OSPF-TE, IS-IS-TE). As extensões são necessárias para a utilização dos novos tipos de comutação suportados. Também é introduzido um novo protocolo, chamado de protocolo de gerenciamento de enlaces (LMP – *Link-Management Protocol*), com a função de gerenciar e manter os planos de dados e controle entre nós vizinhos. A seguir, um resumo dos protocolos, com suas principais características, é apresentado:

- Roteamento – OSPF-TE, IS-IS-TE: São protocolos de roteamentos responsáveis por descobrir de forma automática a topologia da rede, propagar a disponibilidade de recursos (por exemplo, tipos de proteção e largura de banda). As maiores mudanças em relação ao MPLS são: capacidade de propagar tipos de proteção de enlaces; implementação da *forward adjacency* para aumento de escalabilidade da rede; capacidade de aceitar e propagar enlaces sem endereço IP (*link-ID*); identificação de entrada e saída de interface; descobrimento de rotas para proteção diferentes do caminho primário.
- Sinalização – RSVP-TE, CR-LDP: São protocolos de sinalização utilizados no estabelecimento de LSPs baseados em engenharia de tráfego. Os maiores melhoramentos são: permuta de rótulos em redes que não comutam pacotes (*generalized labels*); estabelecimento de LSPs bidirecionais; sinalização para estabelecimento de caminhos de *back-up*; aceleração da atribuição de rótulos

através da sugestão de rótulos; suporte a comutação de grupos de comprimentos de ondas (*waveband*).

- Gerenciamento de enlaces – LMP: Este novo protocolo consiste de vários procedimentos entre nós adjacentes para prover serviços como:
 - Gerenciamento do canal de controle (*control-channel management*): Responsável pelo estabelecimento e manutenção dos canais de controle. Os canais de controle são estabelecidos baseado em parâmetros de negociação do enlace e garantem a conectividade do enlace usando protocolo *Hello* rápido.
 - Correlação de propriedades de enlace (*link property correlation*): Permite a identificação de propriedades de enlace entre nós adjacentes. Por exemplo, informações para agrupamento de enlaces (*link bundling*), mudanças de mecanismo de proteção em um enlace, mudanças em identificadores de portas.
 - Verificação de conectividade de enlace (*link-connectivity verification*): É um procedimento opcional de verifica a conectividade física entre nós vizinhos e também trocar identificadores de enlaces usados na sinalização GMPLS.
 - Gerenciamento de falhas (*fault management*): Este procedimento inclui a detecção, localização e detecção de faltas. Isto é especialmente útil na comutação totalmente óptica, onde não existe até agora método definido para localização de erros, e a informação sobre erros tem de ser propagada “fora da banda” (*out-of-band*) através do plano de controle.

Uma melhor explicação das funções desempenhadas por estes protocolos será feita no decorrer deste capítulo.

A figura 3.3 mostra um exemplo da pilha de protocolos GMPLS.

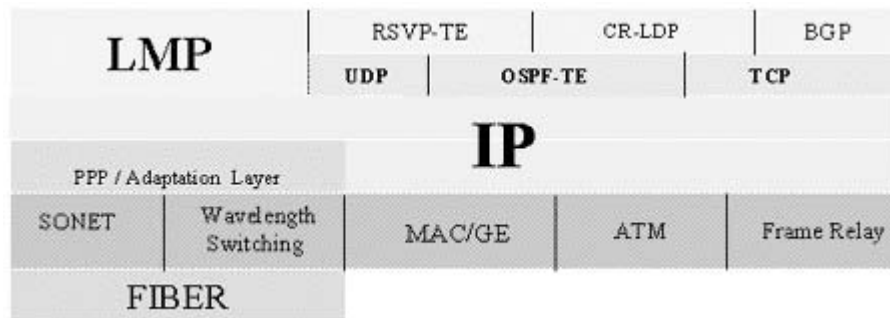


Figura 3.3: Pilha de protocolos GMPLS [5].

3.6 – Funcionamento do GMPLS

Diversos fatores devem ser levados em consideração na implementação do GMPLS, por abranger redes de tipos tão diferentes. Alguns desses problemas estão enumerados a seguir:

- O encaminhamento de dados não é mais feito somente por dispositivos capazes de comutar pacotes. O protocolo deve ser capaz de manter a simplicidade do encaminhamento usando rótulo em dispositivos capazes de comutar no tempo, comprimento de ondas ou no espaço (fibra, porta).
- Alguns tipos de redes, como as redes totalmente ópticas, não são capazes de examinar o conteúdo dos dados recebidos e extrair o rótulo. As redes comutadas a pacote, por exemplo, analisam o cabeçalho dos pacotes, conferem o rótulo e então tomam a decisão de encaminhamento. Equipamentos em redes ópticas e TDM não são capazes de examinar o conteúdo dos dados que recebem.
- A alocação de largura de banda em LSPs só pode ser feita em unidades discretas nas interfaces TDM, LSC e FSC. Redes comutadas a pacotes podem ter fluxos de 1, 10 ou 100 Mb/s. Uma rede óptica, no entanto, possui enlaces com largura de banda fixa: OC-12, OC-48, etc. Se um LSP com um fluxo de 1 Mb/s é iniciado em um dispositivo PSC e precisa ser transportado através de um enlace óptico OC-12 (622Mb/s), é um desperdício imenso alocar um enlace deste somente para um fluxo de 1 Mb/s.
- Os recursos a serem gerenciados em redes SONET/SDH e ópticas são muito maiores que os geralmente utilizados em redes baseadas em pacotes. Dessa forma, a escalabilidade deve ser levada em conta para permitir mudanças possam ser

adotadas em uma grande rede de forma suave. Espera-se que no futuro as redes ópticas transportem dados utilizando centenas de comprimentos de onda em centenas de fibras ópticas.

- A configuração de comutadores ópticos e eletrônicos pode tomar algum tempo. Essa latência no estabelecimento de LSPs nesses dispositivos pode ter um efeito cumulativo e atrasar o início da transferência de dados fim-a-fim.
- O plano de controle GMPLS deve ser capaz de acomodar diversos níveis de proteção, como a capacidade das redes SONET de trocar de um caminho defeituoso para um funcional rapidamente (50 milissegundos). Deve prover também um mecanismo de restauração de caminhos defeituosos através de roteamento estático ou dinâmico.

A partir dos problemas mencionados, serão descritas diversas funcionalidades do plano de controle GMPLS.

3.6.1 – Rótulo Generalizado e sua Distribuição

O Rótulo Generalizado (*Generalized Label*) é uma extensão do rótulo do MPLS tradicional, permitindo não só a representação de rótulos que viajam na mesma banda (*in-band*) que os pacotes de dados associados, mas também rótulos (virtuais) que identificam posições multiplexadas em intervalos de tempo, comprimentos de onda ou no espaço. O Rótulo Generalizado pode identificar, por exemplo, uma fibra óptica dentro de um grupo, um grupo de comprimentos de onda (*waveband*) dentro de uma fibra, um comprimento de onda dentro de um *waveband* ou fibra, ou um conjunto de intervalos de tempo dentro de um comprimento de onda ou fibra. Pode ser também um rótulo MPLS genérico, um rótulo Frame Relay ou um rótulo ATM (VCI/VPI). O formato de um rótulo pode ser tão simples quanto um valor inteiro no caso de um comprimento de onda ou mais elaborado como um rótulo SDH/SONET.

Partindo do fato que os nós que enviam e recebem Rótulos Generalizados sabem os tipos de enlace que utilizam, o Rótulo Generalizado não identifica o tipo de enlace utilizado, ao invés disso é esperado que os nós identifiquem a partir do contexto qual tipo de rótulo esperar.

Um Rótulo Generalizado carrega apenas um nível de rótulo, não possuindo assim hierarquia. Quando múltiplos níveis de rótulos (LSPs dentro de LSPs) são necessários, cada LSP deve ser estabelecido separadamente.

A distribuição de rótulos é similar ao MPLS, começando quando um *upstream* LSR pede um rótulo do *downstream* LSR. Para agilizar o estabelecimento de LSPs, o GMPLS amplia esta funcionalidade permitindo que o *upstream* LSR sugira um rótulo, porém este rótulo pode ser ignorado pelo *downstream* LSR.

Criação de LSPs em Redes Baseadas em GMPLS

O estabelecimento de um caminho comutado por rótulo (LSP) em uma rede GMPLS é mostrado na figura 3.4. Uma rede baseada em pacotes (PSC) está conectada via OC-12 *pipe* ao DCS1 da rede baseada em TDM. Ambas as redes TDM da ilustração utilizam arquitetura de anel SONET UPSR (Unidirectional Path-Switched Ring) OC-48. Estas duas redes TDM são interconectadas por dois OXC capazes de prover múltiplos comprimentos de onda (lambdas) OC-192. O objetivo neste exemplo é estabelecer um LSP (LSPpc) entre LSR1 e LSR4.

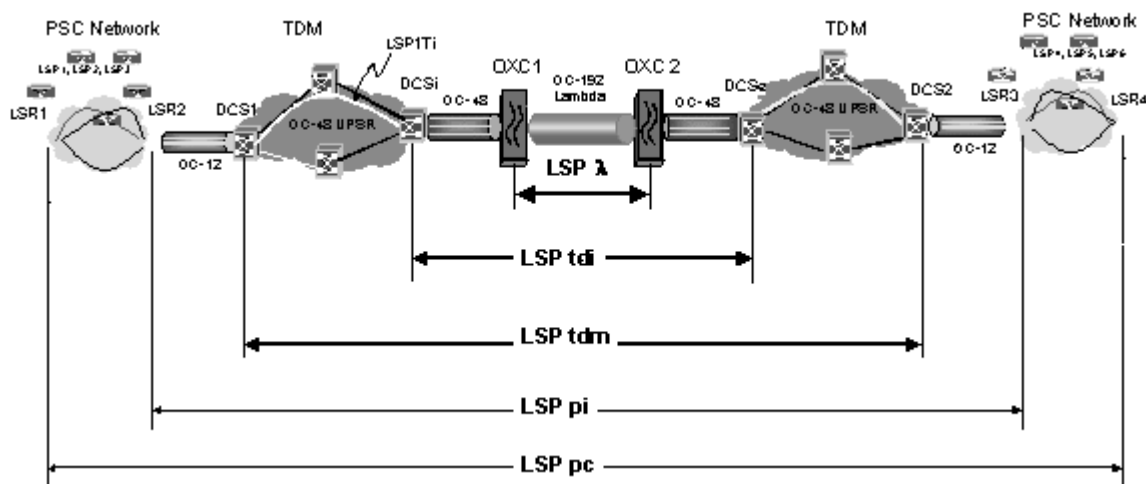


Figura 3.4: Estabelecimento de LSPs em uma rede heterogênea com GMPLS [5].

Para que o LSPpc entre LSR1 e LSR4 seja estabelecido, outros LSPs precisam ser estabelecidos em outras redes para “tunelar” (*tunnel*) os LSPs de hierarquia mais baixa. Na figura 3.4, por exemplo, o LSP1Ti carregará os LSP1, LSP2 e LSP3 se puder acomodar a soma dos requerimentos de engenharia de tráfego desses LSPs.

Para estabelecer o LSP_{pc}, é enviada uma mensagem *downstream* PATH/Label Request (rótulo com requerimento de caminho) para o destino que carregará o LSP de mais baixa hierarquia. Por exemplo, o DSC_i envia esta mensagem para OXC₁, destinada para DSC_e. Quando o OXC₁ recebe a mensagem, irá ser criado um LSP entre OXC₁ e OXC₂. Apenas após o estabelecimento deste LSP (LSP_λ) será estabelecido um LSP entre DCS_i e DCS_e (LSP_{tdi}).

A mensagem PATH/Label Request contém um Generalized Label Request (requerimento de rótulo generalizado) com o tipo de LSP (camada envolvida) e o tipo de *payload* (por exemplo, DS-3, VT, etc.). Vários parâmetros específicos também estão contidos nesta mensagem, como a proteção local, tipo de sinal, rótulos sugeridos, LSP bidirecional. O nó *downstream* irá responder com uma mensagem RESV/Label Mapping que inclui um rótulo generalizado que pode conter vários rótulos generalizados.

Quando o LSR que iniciou o processo recebe o rótulo generalizado, ele pode então estabelecer um LSP com seu *peer* (um LSR de mesmo tipo) através de mensagens RSVP/PATH por domínio de rede. No exemplo mostrado pela figura 4, o estabelecimento do LSP_{pc} acontece nesta sequência:

1. É estabelecido o LSP entre OXC₁ e OXC₂ (LSP_λ), capaz de oferecer OC-192 *lambdas* para tunelar LSPs entre redes TDM.
2. Estabelecimento do LSP entre DCS_i e DCS_e (LSP_{tdi}).
3. Estabelecimento do LSP entre DCS₁ e DCS₂ (dentro das redes TDM são estabelecidos LSP antes do estabelecimento deste LSP).
4. É estabelecido o LSP entre LSR₂ e LSR₃ (LSP_{pi}).
5. Finalmente é estabelecido o LSP entre LSR₁ e LSR₄ (LSP_{pc}).

3.6.2 – Diversidade de Encaminhamento

Os dispositivos MPLS são capazes de discernir o conteúdo das unidades de informação que passam por eles, podendo perceber pacotes ou células e ler seu cabeçalho. Estes dispositivos precisam ler o rótulo de um pacote que está chegando para poder determinar sua porta de saída e seu rótulo de saída. Dessa forma, a separação entre o plano de dados e de controle é feita logicamente.

O GMPLS estende este paradigma para permitir que os planos de dados e de controle sejam fisicamente ou logicamente separados, pois não é mais exigido que o canal de controle entre dois nós adjacentes divida o mesmo meio físico que o enlace que transporta os dados

entre eles. Por exemplo, um canal de controle pode utilizar um comprimento de onda separado, um enlace Ethernet, ou um túnel IP em uma rede de gerenciamento separada.

3.6.3 – Configuração

Quando um LSP é iniciado a partir de uma rede de acesso, é necessário o estabelecimento de vários outros LSPs intermediários. Estes LSPs intermediários podem ser estabelecidos em redes com equipamentos TDM ou LSC. Devido a diferente natureza dos equipamentos presentes nestas redes, o GMPLS precisa adaptar-se a estas diferenças de modo a acelerar o estabelecimento de LSPs fim-a-fim. Alguns novos conceitos são apresentados no GMPLS para acomodar estas diferenças.

3.6.3.1 – Sugestão de Rótulo

Como já mencionado, o GMPLS permite opcionalmente que o nó *upstream* sugira um rótulo. Esta sugestão pode ser ignorada pelo nó *downstream* mas em muitos casos, ao custo de um maior tempo de configuração de LSP. Um grande benefício do rótulo sugerido (*suggested label*) é no estabelecimento de LSPs através de determinados equipamentos ópticos que apresentam um processo demorado (em termos elétricos) de reconfiguração de sua estrutura de comutação. Um exemplo de equipamento são os comutadores ópticos que possuem micro-espelhos que precisam ser movimentados. Se o rótulo e os dispositivos de comutação forem configurados na direção reversa, o estabelecimento de LSPs pode ser atrasado em décimos de segundo a cada *hop*. Isso pode ser importante no caso da restauração onde LSPs alternativos precisam ser estabelecidos rapidamente.

3.6.3.2 – Restrição de Rótulo

Um nó *upstream* pode opcionalmente restringir a escolha de rótulos por um nó *downstream* a um conjunto de rótulos aceitáveis. A restrição é provida por um Conjunto de Rótulos (*Label Set*) formado por listas ou intervalos de rótulos inclusivos (aceitáveis) ou exclusivos (inaceitáveis). Existem pelo menos quatro casos em que a restrição de rótulos é útil no domínio óptico:

1. O primeiro caso é quando o equipamento de destino é capaz de transmitir e receber apenas em um pequeno conjunto de comprimento de ondas ou bandas.
2. O segundo caso ocorre quando há uma sequência de interfaces que não possuem capacidade de conversão de comprimento de onda e necessitam que o mesmo

comprimento de onda seja utilizado fim-a-fim em uma sequência de *hops* ou até mesmo no caminho inteiro.

3. O terceiro caso é quando é desejável limitar a quantidade de conversão de comprimento de onda sendo feita para reduzir a distorção em sinais ópticos.
4. O último caso acontece quando as duas extremidades de um enlace suportam diferentes conjuntos de comprimentos de onda.

O receptor de um Conjunto de Rótulos precisa restringir sua escolha de rótulo a um que esteja contido nesse conjunto. Um Conjunto de Rótulos pode estar presente em múltiplos *hops*. Neste caso, cada nó gera seu próprio Conjunto de Rótulos de saída, baseado possivelmente no Conjunto de Rótulos de entrada e em suas capacidades de *hardware*. Espera-se que este seja o procedimento padrão em nós com interfaces sem capacidade de conversão de comprimento de onda.

3.6.3.3 – LSP Bidirecional

Em redes ópticas, a proteção contra falhas, como a quebra de uma fibra óptica, é feita com o uso de fibras extras para *back-up*. Os LSPs estabelecidos dentro de uma rede óptica também precisam de proteção. Para prover esta proteção, o GMPLS permite que sejam estabelecidos LSPs bidirecionais simétricos. Um LSP bidirecional simétrico possui os mesmos requerimentos de engenharia de tráfego e restauração em ambas as direções.

O GMPLS permite que os LSPs bidirecionais sejam configurados utilizando apenas um conjunto de mensagens do protocolo de sinalização (por exemplo, RSVP/PATH e RESV). Isto diminui a latência de configuração nos comutadores ópticos e a quantidade de informações de controle trocadas.

3.6.4 – Escalabilidade

Para que possa gerenciar os imensos recursos oferecidos pelas redes ópticas, o GMPLS apresenta as seguintes soluções.

3.6.4.1 – Adjacência de Encaminhamento

Para aumentar a escalabilidade do GMPLS, existe a possibilidade de agregar múltiplos TE LSPs em um TE LSP maior. Isto é proporcionado pela adjacência de encaminhamento. Um FA-LSP (*Forwarding Adjacency – LSP*) é um LSP que transporta outros LSPs. Um FA-

LSP estabelecido entre dois nós GMPLS é visto externamente como um enlace virtual com suas próprias características de engenharia de tráfego e pode ser anunciado pelos protocolos de roteamento OSPF/IS-IS como um enlace normal, como qualquer outro enlace físico. Um FA-LSP pode então ser incorporado no banco de dados de estado de enlaces (*link-state database*) e utilizado no cálculo de caminhos de roteamento para carregar outros LSPs. Isto ajuda também a reduzir o tamanho do banco de dados e, conseqüentemente, o tempo de consulta a tabela de roteamento.

Um FA-LSP pode ser um enlace numerado ou não e pode ser agrupado com outros enlaces, não importando se são enlaces normais ou FA-LSP. Os conceitos de agrupamento de enlaces (*link bundling*) e não numeração de enlaces são comentados mais adiante.

Um exemplo de FA-LSP é mostrado na figura 3.5. O LSP TDM (LSPtdm) conecta duas redes baseadas em pacotes. Este FA-LSP pode ser visto como um único enlace pelos LSRs nas duas redes, ao invés dos múltiplos enlaces físicos da rede TDM.

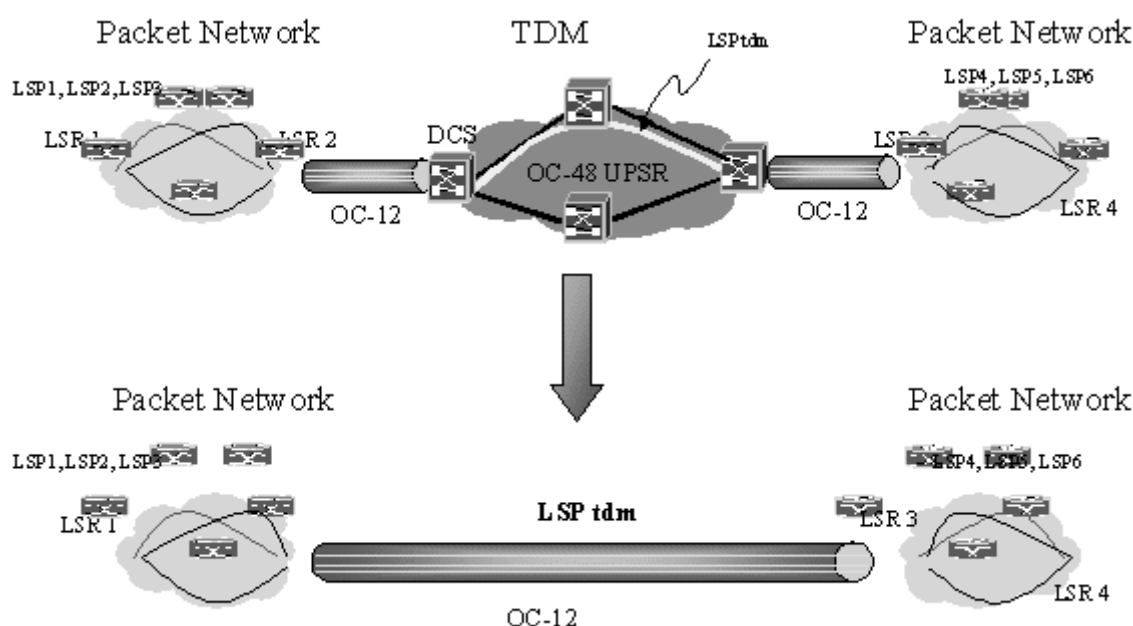


Figura 3.5: Exemplo de FA-LSP [5].

3.6.4.2 – Hierarquia de LSPs

As redes geralmente possuem uma hierarquia com diferentes capacidades de largura de banda por nível de hierarquia. Um exemplo de hierarquia de rede está na figura 3.6, com redes de acesso, metropolitana e de longa distância. Quando um determinado fluxo fim-a-fim é estabelecido, provavelmente ele vai atravessar dispositivos que não têm capacidade de

configurar conexões com níveis de largura de banda flexíveis, ou seja, apenas níveis discretos estão disponíveis. Fica claro, no entanto, que um enlace OC-192 entre dois comutadores ópticos não deve transportar um fluxo de 100 Mb/s ou até mesmo 2,5 Gb/s, pois é um desperdício extremo. Por isso, é interessante agregar fluxos mais lentos em fluxos mais rápidos. Isto leva a idéia de hierarquia de LSPs.

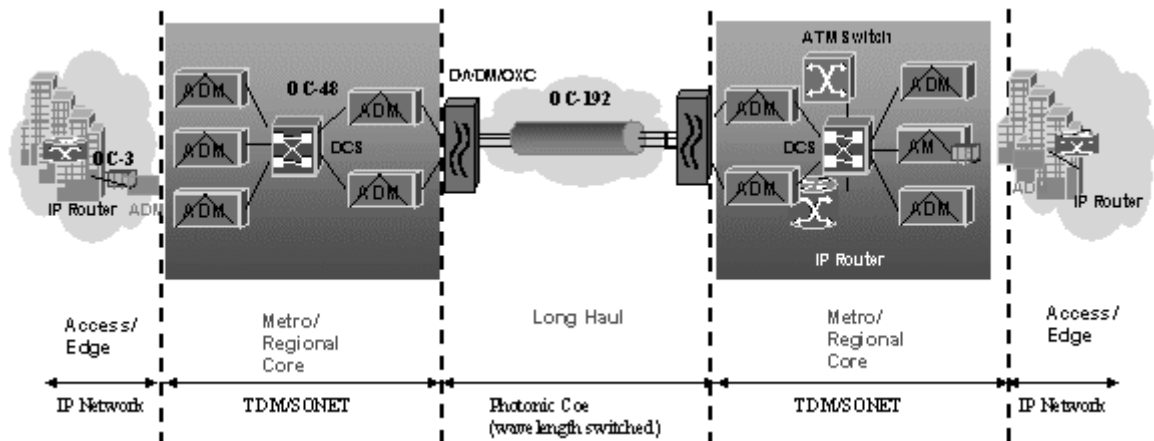


Figura 3.6: Exemplo de hierarquia de rede [5].

Este conceito de hierarquia de LSPs originou-se da idéia contida originalmente no MPLS de LSPs embutidos (*nested* LSPs), que facilitou a formação de uma hierarquia de encaminhamento. A hierarquia de LSPs pode ocorrer em dispositivos de mesma interface, ou entre interfaces diferentes.

Pode-se construir uma hierarquia, por exemplo, quando uma interface é capaz de multiplexar diversos LSPs de uma mesma tecnologia (camada). Por exemplo, um LSP SONET/SDH de baixa ordem (VC-12) pode ser embutido em um LSP SONET/SDH de ordem mais alta (VC-4).

A hierarquia ocorre também entre interfaces diferentes. No topo da hierarquia estão as interfaces FSC, seguidas pelas interfaces LSC, seguidas pelas interfaces TDM, seguidas pelas interfaces L2SC, seguidas finalmente pelas interfaces PSC. Um exemplo ilustrativo da hierarquia de LSPs é mostrado na figura 3.7.

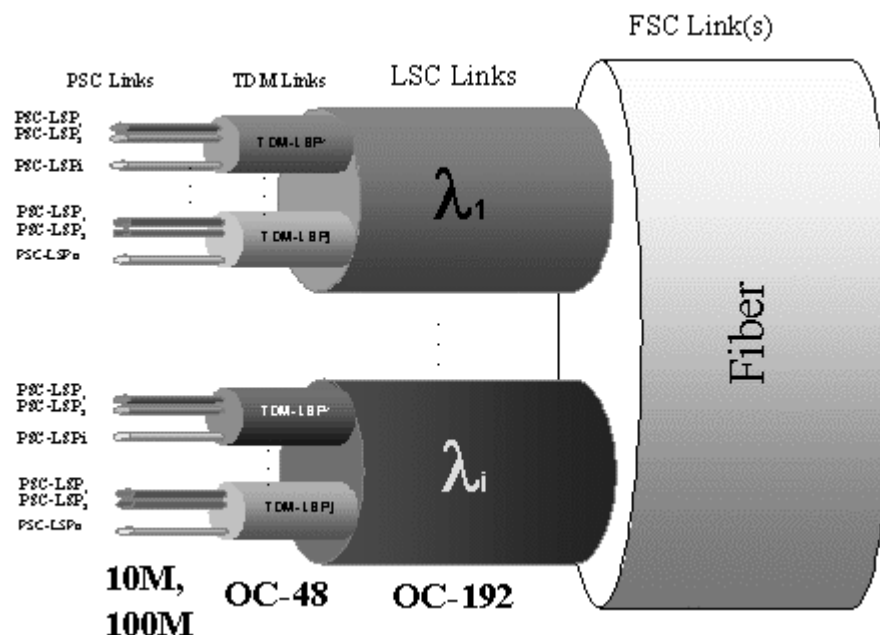


Figura 3.7: Hierarquia de LSPs [5].

3.6.4.3 – Agrupamento de Enlaces

O conceito de agrupamento de enlaces (*Link Bundling*) é fundamental para a utilização do GMPLS como plano de controle em determinadas redes. É o caso das redes ópticas que possuem crossconnects ópticos (LSRs) conectados por centenas de comprimentos de onda. Cada um destes comprimentos de onda tem que ser anunciado de forma independente sem o uso do agrupamento de enlaces. Isto tornaria extremamente complexa a aplicação de protocolos de roteamento, como OSPF e IS-IS, para descobrimento de recursos da rede e computação de rotas dinâmicas.

Quando um par de LSRs é conectado por múltiplos enlaces, é possível que os protocolos de roteamento OSPF e/ou IS-IS anunciem vários destes enlaces (ou todos) como um único enlace. Este processo chama-se agrupamento de enlaces. O enlace lógico resultante é chamado de enlace agrupado (*bundled link*), enquanto os enlaces físicos são chamados de enlaces componentes (*component links*), sendo identificados por índices de interface.

A identificação de recursos nestes enlaces para sua utilização é feita a partir da combinação de três identificadores – identificador de enlace (agrupado), identificador de enlace componente e rótulo.

A utilização do agrupamento de enlaces diminui consideravelmente o banco de dados de estados de enlaces e a quantidade de enlaces a serem anunciados, com alguma perda de

informação devido ao aumento do nível de abstração. Um enlace agrupado utiliza apenas um canal de controle, ajudando a diminuir ainda mais a troca de mensagens dos protocolos de roteamento e sinalização.

Existem algumas restrições para o agrupamento de enlaces:

1. Todos os enlaces que compõem um enlace agrupado precisam começar e terminar no mesmo par de LSRs.
2. Todos os enlaces que compõem um enlace agrupado precisam ser do mesmo tipo (por exemplo, ponto-a-ponto ou multi-acesso).
3. Todos os enlaces que compõem um enlace agrupado precisam ter uma mesma métrica de engenharia de tráfego (por exemplo, tipo de proteção e largura de banda)
4. Todos os enlaces que compõem um enlace agrupado precisam ter as mesmas capacidades de comutação – PSC, L2SC, TDM, LSC OU FSC.

O GMPLS permite que FA-LSPs sejam enlaces componentes juntamente com enlaces ponto-a-ponto, desde que compartilhem determinadas características.

3.6.5 – Utilização Eficiente de Recursos

Com a grande disponibilidade de recursos criado pelas redes ópticas, é importante a criação de métodos para seu eficiente gerenciamento. No GMPLS, duas das propostas para enfrentar este problema são o agrupamento de enlaces e enlaces não-numerados (*unnumbered links*). O agrupamento de enlaces já foi comentado anteriormente, e foi demonstrada sua capacidade de reduzir a quantidade de mensagens de controle através da rede. Outro problema a ser resolvido para aplicação do GMPLS em redes ópticas é o potencial uso de uma quantidade imensa de endereços IP, e isso é solucionado pelo uso de enlaces não-numerados.

3.6.5.1 – Enlaces Não-numerados (*Unnumbered Links*)

Enlaces (ou interfaces) não-numerados são enlaces (ou interfaces) que não possuem endereços IP. Ao invés disso, para obter uma representação destes enlaces são utilizados a identificação do roteador (*Router ID*) e a identificação de interface de saída ou o identificador local de enlace para compor uma identificação de interface não-numerada (*Unnumbered Interface ID*).

A utilização desta estratégia é justificada pelos seguintes fatores:

- A quantidades de enlaces presentes nas redes atuais e futuras (canais TDM, comprimentos de onda e fibras ópticas) tornam o gerenciamento destes recursos utilizando endereços IP muito complexo e demorado.
- Endereços IP são considerados recursos escassos (endereços IPv4 estão quase esgotados).

3.6.6 – Confiabilidade

Um dos aspectos mais cruciais na operação de uma rede é sua confiabilidade, sua capacidade de recuperar-se de falhas. Com relação a este aspecto, o GMPLS possui a capacidade de gerenciar falhas nas diversas camadas que compõem uma rede de forma automatizada.

O fato do GMPLS poder ser utilizado como plano de controle de diversas camadas permite que a coordenação entre os recursos de proteção e restauração (P&R) presentes em diferentes domínios e camadas da rede. Sem a coordenação entre as diferentes camadas, falhas em camadas mais baixas podem acionar os mecanismos de recuperação de camadas superiores, podendo causar sub-utilização dos recursos da rede e até mesmo instabilidades. Dois mecanismos podem ser utilizados na coordenação entre camadas: o primeiro é de “baixo para cima”, deixando que camadas inferiores recuperem-se da falha, impedindo o acionamento das camadas superiores; o segundo modo é “cima para baixo”, com as camadas superiores tentando recuperar-se sem a intervenção de camadas inferiores.

A escolha de um esquema de proteção é um compromisso entre a utilização de recursos da rede e o tempo de recuperação. Para a obtenção de um tempo de recuperação menor, maior será a quantidade de recursos da rede que devem ser alocados para prover esta proteção. O GMPLS permite o uso de diferentes esquemas de proteção dentro de um mesmo LSP, dando bastante flexibilidade aos operadores de rede. Dessa forma, os operadores podem oferecer LSPs com diferentes níveis de serviço, definidos com base em sua confiabilidade.

3.6.6.1 – Diferentes Estágios no Gerenciamento de Falhas

Diversos passos são necessários para a recuperação de uma falha na rede, incluindo detecção de falha, localização de falha, notificação, recuperação (proteção e restauração propriamente ditas) e restabelecimento (retorno do tráfego ao LSP original ou sua transferência para um novo LSP) do tráfego [4].

- A detecção de falhas é dependente da tecnologia e implementação dos dispositivos. Geralmente as falhas são detectadas por mecanismos de camadas

mais baixas (por exemplo, SDH/SONET, Loss-of-light [LOL – perda de luz]). Quando uma falha é detectada por um nó, um alarme pode ser passado a uma entidade GMPLS ou o alarme pode ser propagado na própria camada.

- A localização de falhas pode ser feita com o auxílio do GMPLS, através do protocolo de gerenciamento de enlaces (LMP). Esse é um recurso muito interessante em redes ópticas transparentes, que não possuem mecanismos definidos para localização de falhas.
- A notificação de falhas também pode ser feita através do GMPLS, utilizando os protocolos de sinalização RSVP-TE/CR-LDP.

3.6.6.2 – Estratégias de Recuperação

As técnicas de recuperação de rede podem ser divididas em proteção e restauração. Na proteção, os recursos entre os pontos a serem protegidos são alocados antes da falha, e a conexão após uma falha é restabelecida com um simples chaveamento. A restauração, no entanto, utiliza a sinalização após a falha para alocar recursos ao longo do caminho de recuperação.

A proteção tem como objetivo básico possibilitar tempos de reação bastante rápidos, e pode utilizar os campos de controle do *overhead* para coordenar os pontos finais. As redes SONET/SDH possuem mecanismos de proteção bem definidos e eficientes. Os mecanismos de proteção podem ser classificados de acordo com seu nível de redundância e compartilhamento de recursos.

A restauração baseia-se nos protocolos de sinalização para coordenar as ações de comutação durante a recuperação. Pode envolver apenas realocação (sinalização apenas no momento da recuperação) ou pré-sinalização (sinalização antes da recuperação).

Os mecanismos de recuperação podem ser utilizados de forma local (entre nós adjacentes) ou fim-a-fim (proteção do caminho).

3.6.6.3 – Classificação dos mecanismos de recuperação

Os mecanismos de proteção geralmente são definidos de acordo com a tecnologia utilizada, porém isso não impede outros mecanismos de proteção:

- Proteção de Enlace (*Link Protection*) 1+1: Dois recursos pre-alocados são utilizados em paralelo. Por exemplo, os dados podem ser transmitidos simultaneamente e o nó receptor seleciona a melhor fonte.

- Proteção de Enlace 1:N: Os recursos para funcionamento e proteção da rede são pre-alocados (N para funcionamento, 1 para *back-up*). Quando um dos N recursos falha, os dados são chaveados para o recurso de proteção utilizando-se um mecanismo de coordenação. De forma mais geral, podem ser utilizados M recursos para proteção e N para funcionamento (M:N link protection).
- Proteção Otimizada (*Enhanced Protection*): Utilização de vários mecanismos de proteção, como anéis de proteção, com o objetivo de elevar o nível de proteção para além de falhas em um único enlace e incluir proteção contra falhas em nós e múltiplas falhas em enlaces ligando nós adjacentes.
- Proteção de LSP 1+1: Os dados são transmitidos simultaneamente em dois LSPs e o destino seleciona o LSP que utilizará.

A restauração feita com o auxílio do GMPLS pode ser feita desde décimos de segundos a segundos, dependendo da configuração da rede. Os mecanismos de restauração são expostos abaixo:

- Restauração de LSP fim-a-fim com realocação: Um caminho fim-a-fim de restauração é estabelecido após a falha. Esse caminho pode ser calculado dinamicamente após a falha ou previamente calculado antes da falha (no estabelecimento do LSP). Nenhuma sinalização é utilizada antes da falha e nem um recurso está previamente alocado. Desta forma, não há garantia que um determinado caminho de restauração esteja disponível.
- Restauração de LSP fim-a-fim com reserva de largura de banda para recuperação pré-sinalizada e sem pré-seleção de rótulos: Um caminho de restauração fim-a-fim é previamente calculado antes da falha e uma mensagem de sinalização é enviada neste caminho para reservar largura de banda, porém sem seleção de rótulos. Os recursos utilizados em cada enlace do caminho de recuperação podem ser compartilhados por diversos LSPs, desde que não sejam esperadas falhas conjuntas. Quando uma falha é detectada, inicia-se a sinalização LSP ao longo do caminho de restauração para seleção de rótulos e iniciação das *cross-connections* adequadas.
- Restauração de LSP fim-a-fim com reserva de largura de banda para recuperação pré-sinalizada e com pré-seleção de rótulos: Semelhante a anterior, só que juntamente com a seleção de largura de banda ocorre a seleção de rótulos. Nas

redes baseadas em TDM, LSC e FSC, a sinalização LSP é utilizada para estabelecer *cross-connections* nos comutadores intermediários do caminho de restauração usando os rótulos previamente selecionados.

- Restauração de LSP local: Os enfoques apresentados acima podem ser aplicados de forma local (entre nós adjacentes) ao invés de fim-a-fim. Isto é útil na redução no tempo de recuperação.

A escolha do esquema de recuperação a ser utilizado pelos operadores de rede depende de três critérios: robustez (capacidade do esquema de recuperar-se de uma grande variedade de falhas), tempo de recuperação e compartilhamento de recursos.

3.7 – Problemas do GMPLS

O conjunto de protocolos GMPLS ainda está em fase de padronização até o presente momento. Existem vários tópicos que ainda precisam ser resolvidos para sua padronização e conseqüente utilização prática. Alguns destes tópicos são expostos a seguir.

- **Segurança**

No roteamento IP tradicional, o conteúdo do cabeçalho de um pacote IP recebido é examinado para que seu próximo *hop* seja determinado. Apesar de consumir tempo, este passo permite o estabelecimento de *firewalls*, já que as informações necessárias para isto estão contidas no cabeçalho, ou seja, os endereços de fonte e destino, que são globalmente únicos. Diferentemente, o GMPLS utiliza para acelerar o encaminhamento rótulos que possuem apenas significado local, ou seja, os pacotes só são entendidos e utilizados pelo próprio dispositivo GMPLS. Sendo assim, estes rótulos não podem ser utilizados para propiciar controle de acesso ou segurança na rede. O GMPLS, por si só, não acrescenta nenhuma segurança em relação ao MPLS original. Uma das maneiras de estabelecer segurança em uma rede GMPLS é forçar segurança de acesso durante o estabelecimento de conexões, como é feito em ATM.

- **Equilíbrio de Rede**

Quando um novo recurso é adicionado ou retirado em uma rede GMPLS, o conjunto de informações trocado é maior que o de uma rede IP tradicional. O GMPLS utiliza modelos

de engenharia de tráfego que incluem a introdução um conjunto de parâmetros de tráfego associados a enlaces de dados, roteamento baseado em restrições, etc. Teoricamente, então, uma rede GMPLS demoraria mais tempo para atingir o equilíbrio após uma interrupção na rede que uma rede IP tradicional.

- **Sistemas de Gerenciamento de Rede**

Os sistemas de gerenciamento de rede (*Network Management Systems* [NMS]) de uma rede GMPLS precisam manter-se atualizados em relação a milhares (até milhões) de LSPs para seu *status* operacional, caminhos de roteamento, engenharia de tráfego, etc. Isto os torna mais complexos que os NMS de uma rede IP tradicional.

Capítulo 4 – Comutação Óptica de Rajadas

O tópico a ser abordado neste capítulo é a comutação óptica de rajadas. Num primeiro momento, serão introduzidas suas principais características e feitas comparações com as técnicas de comutação mais comuns: de circuitos e de pacotes. Depois, é feita uma discussão sobre três técnicas diferentes de comutação de rajadas, em seguida, é apresentada uma nova variação adequada para ser empregada no transporte IP em redes ópticas WDM.

4.1 – Considerações Gerais

Em capítulos anteriores, foi visto que as redes ópticas de terceira geração são capazes de oferecer caminhos ópticos a suas camadas clientes. Embora representem grande avanço e a utilização do GMPLS facilite bastante sua integração com IP, elas ainda não são ideais para transporte IP. Devido a natureza do tráfego da Internet, a comutação de circuitos (caminhos ópticos) pode mostrar-se ineficiente para o transporte direto de tráfego IP. Isso acontece porque, diferentemente do tráfego de voz, o tráfego IP não é contínuo, e sim formado por rajadas de dados. Por exemplo, em uma rede IP, uma imagem de alguns megabytes (formada por vários pacotes IP) constitui uma rajada. Nesse contexto, é apresentada uma proposta [7], a comutação óptica de rajadas (*Optical Burst Switching* [OBS]), que é um mecanismo onde rajadas de dados são comutadas.

Algumas diferenças e semelhanças entre a comutação de rajadas e seus dois equivalentes mais conhecidos, a comutação de circuitos e a comutação de pacotes, são expostas a seguir:

- Uma rajada pode ser considerada como uma entidade de granularidade intermediária. Uma chamada (ou sessão) em comutação de circuitos consiste na transferência de várias rajadas; enquanto uma rajada em comutação de pacotes é transferida na forma de vários pacotes.
- Com a utilização de comutação de rajadas, uma rajada pode passar diretamente por nós intermediários (*cut through*) sem precisar ser processado ou armazenado. Isto é uma grande vantagem em relação a comutação de pacotes, que precisam armazenar e encaminhar os dados (*store and forward*) em cada nó intermediário. Isto é especialmente vantajoso em redes ópticas, pois não existe o equivalente a

memória RAM (*random access memory*) óptico, e a única forma de atrasar (por um tempo limitado) um sinal de dados ópticos com o uso de linhas de atraso de fibras ópticas (*fiber-optic delay lines* [FDL]).

- Na comutação óptica de rajadas, a largura de banda para uma rajada pode ser reservada em um único processo (*one-way process*), ou seja, a rajada é enviada sem a necessidade de haver uma confirmação para esta reserva, diferente da comutação de circuitos, onde preciso reservar a largura de banda em dois processos (reserva e confirmação), ou seja, é necessário o estabelecimento de um circuito, o que gera maior atraso no início da transmissão.

4.2 – Técnicas de Comutação de Rajadas

São descritas aqui três variações da comutação de rajadas, conhecidas por “avisa e vai” (*tell-and-go* [TAG]), “delimitador dentro da banda” (*in-band-terminator* [IBT]) e, “reserva de duração fixa” (*reserve-a-fixed-duration* [RFD]). Das três, as duas primeiras têm sido estudadas para utilização em redes eletrônicas, enquanto a terceira para redes ópticas.

Na técnica TAG, primeiro a fonte envia um pacote de controle num canal separado de controle (o que é semelhante a uma requisição de estabelecimento de circuito sob controle distribuído) para reservar a largura de banda (e configurar os comutadores) ao longo do caminho para os dados que seguem, os quais, diferentemente da comutação por circuitos, podem ser enviados no canal de dados sem ter que receber uma confirmação de reserva primeiro. Isto implica que o tempo de *offset* T pode ser (muito) menor que o tempo de estabelecimento de um circuito, ou até mesmo zero como na comutação de pacotes. Após a rajada ser enviada, um outro sinal de controle (similar a um sinal de desativação de circuito) é enviado para liberar a largura de banda. Na técnica IBT, cada rajada possui um cabeçalho (como na comutação de pacotes) bem como um delimitador especial (chamado de *terminator*) que serve para indicar o final da rajada. Isso é bastante semelhante a comutação de pacotes, porém, no IBT, a fonte e qualquer nó intermediário pode começar a transmitir a “cabeça” (não necessariamente o cabeçalho) de uma rajada mesmo antes da sua cauda ser recebida. Dessa forma, a rajada sofrerá um menor atraso e além disso, um menor espaço é necessário no *buffer* do nó, exceto no pior caso, onde a rajada inteira precisar ser retardada em função da largura de banda na saída do comutador não estar disponível.

A terceira variação da comutação de rajadas é a RFD, similar a técnica TAG no sentido de que um pacote de controle é enviado primeiro para reservar a largura de banda (e configurar os comutadores), seguidos pelos dados após um tempo de *offset* T . O que distingue o método RFD do TAG (e outras comutações de circuitos e de pacotes) é que em RFD, a largura de banda é reservada por uma duração específica pelo pacote de controle, que como um cabeçalho de um pacote de tamanho variável, contém o comprimento (esperado) da rajada. Isto implica, no entanto, que a rajada está limitada a um tamanho máximo.

4.2.1 – Comparação entre as Técnicas de Comutação de Rajadas

Embora as três técnicas utilizem métodos diferentes para liberar (e alocar) largura de banda, em uma situação ideal uma rajada consome (quase) a mesma largura de banda. Mesmo assim, o RFD é mais atraente por causa da utilização de um tempo de *offset* e possui menos desvantagens que as outras duas técnicas, como será mostrado a seguir.

Uma das vantagens de usar um tempo de *offset* T é que desde que os dados são atrasados na fonte, não é necessário haver espera nos nós intermediários durante o processamento dos pacotes de controle (ou cabeçalhos) correspondentes. Consequentemente, não é necessário haver *buffers* nos nós intermediários, e mesmo que exista espaço de buffer nestes nós, todo este espaço pode ser utilizado na resolução de conflitos. As desvantagens que podem surgir com o uso de um tempo de *offset* incluem o aumento da latência fim-a-fim e desperdício de largura de banda.

Na comutação de circuitos, um T de pelo menos $2P+\Delta$ (P é o atraso de propagação em um sentido e Δ é o atraso de processamento total enfrentado ao longo do caminho pelo requerimento de configuração de circuito) elimina a necessidade de armazenar dados em qualquer nó intermediário. Já na comutação de rajadas, os dados podem ser enviados antes que os últimos canais sejam estabelecidos para formar um circuito, o que significa que pode-se ter $T < P + \Delta$ e, mesmo assim, os dados não sofrerão atrasos em nós intermediários. Isto pode ser feito porque, desde que $T > \Delta$ e a reserva de largura de banda feita pelo pacote de controle (ou cabeçalho) correspondente tenha sucesso, no momento em que os dados chegam no comutador, o comutador já deve estar configurado. Claro, se o valor de T é feito muito pequeno (por exemplo, igual a zero como no IBT), ou houver congestionamento e nenhuma banda puder ser reservada antes da chegada dos dados, os dados precisarão ser atrasados. Se os dados não puderem ser atrasados, por falta de espaço em *buffer* ou por ter atingido o valor

máximo que pode ser tolerado em aplicações em tempo real, os dados podem ser descartados ou desviados (encaminhados para uma porta alternativa, por exemplo).

Todavia, pode não ser desejável um $T > 0$ para a técnica TAG (e IBT), já que a largura de banda reservada durante o tempo de *offset* será desperdiçada. Mais especificamente, mesmo que a reserva de largura de banda ocorra no momento em que espera-se que a rajada chegue, utilizando comutação *just-in-time* (“bem na hora”), o aproveitamento de largura de banda não será tão eficiente se T maior que zero. Isto porque o *offset* diferente de zero fragmenta a largura de banda, que não pode ser utilizada de modo eficiente por outras rajadas sem preempção.

O caso do RFD é diferente, porque agora é possível para o nó fazer decisões inteligentes, baseado no conhecimento da duração de cada reserva, sobre como alocar largura de banda (assim como espaço em *buffer*) para que a utilização possa ser tão alta quanto possível e próxima da que pode ser alcançada com $T=0$. Em RFD, por exemplo, é possível determinar se será possível satisfazer uma requisição de reserva de banda sem afetar as reservas já existentes; e se uma rajada precisar ser atrasada, exatamente de quanto deve ser este atraso e se existe espaço de *buffer* suficiente para suportar este atraso. Vários assuntos relacionados a RFD serão discutidos na próxima seção, pois servirá de base para a comutação óptica de rajadas.

4.3 – Comutação Óptica de Rajadas

Na comutação óptica de rajadas (OBS), uma rajada de dados é mantida no domínio óptico nos nós intermediários, enquanto seu pacote de controle (ou cabeçalho) pode ser convertido para o domínio elétrico para ser processado. Como cada rajada é transmitida utilizando toda a largura de banda de um comprimento de onda em uma rede WDM enquanto seu pacote de controle é transmitido num comprimento de onda separado, torna-se mais fácil decidir quando fazer requisições e configurar comutadores do que em um sistema de controle baseado em TDM.

A proposta de OBS apresentada aqui é baseada em RFD, pois essa técnica reduz a necessidade de buffer nos nós, o que é fundamental em redes ópticas já que FDLs são recursos escassos. Outra razão é que o RFD é mais eficiente na utilização de largura de banda. Perceba que, em esquema de OBS baseado em IBT, o sinal de término de rajada precisa ser detectado, o que pode ser difícil em uma rede óptica. De maneira similar, num esquema OBS

baseado em TAG, a perda do sinal de desativação produzirá desperdício de banda. Uma alternativa possível seria requisitar que a fonte enviasse periodicamente um sinal de *refresh*, e somente se nenhum destes sinais fosse recebido após um determinado período de tempo, a largura de banda seria liberada. Porém esta abordagem gerará muitos sinais de controle e certamente resultará na liberação indesejada de largura de banda em função da perda de sinais de *refresh*.

A seguir, é descrita uma protocolo de comutação óptica de rajadas baseada em OBS chamado *Just-Enough-Time* (JET) [7].

4.3.1 – *Just-Enough-Time* (JET)

A idéia básica do protocolo JET é mostrada na figura 4.1. De maneira mais específica, a fonte envia um pacote de controle (equivalente a uma requisição de conexão), a qual é seguida por uma rajada após um tempo de *offset* T maior ou igual a Δ (na figura 4.1(a), é considerado que o número de *hops* é $H=3$, e que em cada *hop*, o atraso encontrado por um pacote de controle é δ e, dessa forma, o atraso total encontrado por um pacote de controle é $\Delta=3\delta$). Pelo fato da rajada sofrer atraso na fonte (no domínio elétrico), não são necessárias FDLs nos nós intermediários para atrasar as rajadas enquanto o pacote de controle está sendo processado.

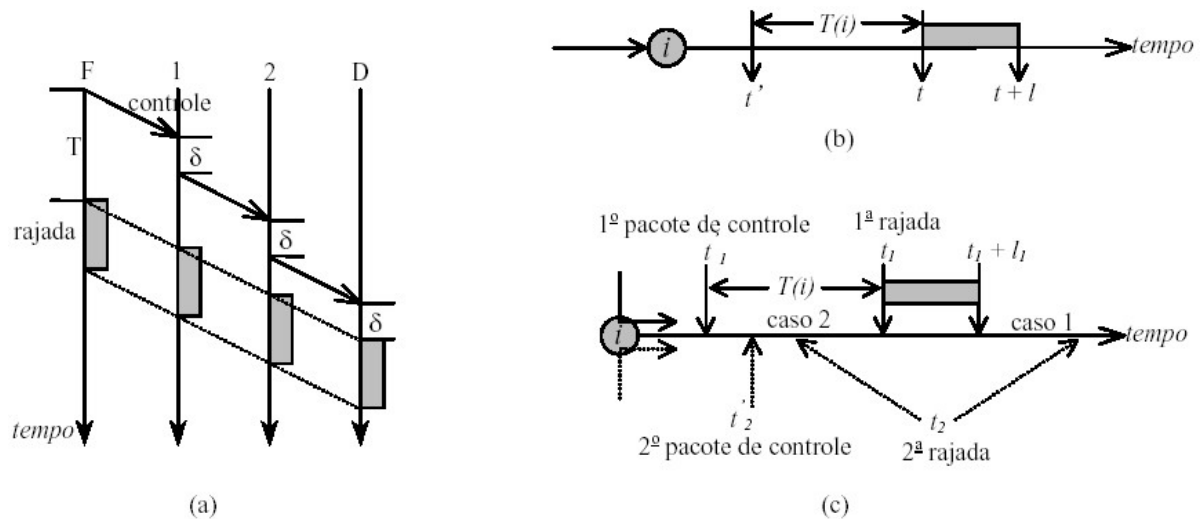


Figura 4.1: Ilustração do protocolo JET.

Uma característica única do protocolo JET é o uso da reserva atrasada (*delayed reservation* - DR) como mostrado na figura 4.1(b), por meio da qual a largura de banda no

enlace de saída do nó i (por exemplo, $i=1;2$) é reservada a partir do instante t , tempo em que espera-se que a rajada chegue, ao invés de t' , tempo em que o processamento do pacote de controle termina (e a requisição pela reserva de largura de banda é feita). Perceba que $t=t'+T(i)$, onde $T(i)$ depende do valor restante de T e também do tempo de processamento no nó i . Além disso, a largura de banda permanecerá reservada até o tempo de partida da rajada, $t+l$, sendo l o comprimento (esperado) da rajada.

A discussão anterior implica que no JET, o pacote de controle incluirá não somente o comprimento da rajada l (como em qualquer protocolo RFD), mas também o valor (restante) do tempo de atraso T_{offset} (inicialmente $T_{\text{offset}} = T$). Para lidar com o atraso de processamento variável encontrado por um pacote de controle, assim como qualquer atraso de recepção e transmissão em cada nó, o pacote de controle pode ser marcado com seu tempo de chegada t_{in} , e agendado para transmissão num tempo t_{out} (tão logo seu processamento termine), sendo $t_{\text{in}} < t' < t_{\text{out}}$. Desta maneira, a largura de banda será reservada a partir de $t=T_{\text{offset}}+t_{\text{in}}$ (isto significa que na figura 4.1(b), $T(i)=T_{\text{offset}}(t'-t_{\text{in}})$), e o pacote de controle carregará um valor atualizado de T_{offset} para o próximo nó, que é $T_{\text{offset}}-(t_{\text{out}}-t_{\text{in}})$.

Se a largura de banda requisitada não estiver disponível, é dito que a rajada está bloqueada, e será descartada se não puder ser colocada em um *buffer* (uma rajada descartada poderá ser retransmitida posteriormente se necessário). O uso da reserva atrasada (DR) pode reduzir o descarte de rajadas (e melhorar a utilização da largura de banda) mesmo sem utilizar nenhum *buffer*, como ilustrado na figura 4.1(c). Mais especificamente, quando o segundo pacote de controle chega, ele sabe que se tanto $t_2 > t_1 + l_1$ (caso 1) ou $t_2 + l_2 < t_1$ (caso 2), a largura de banda para a segunda rajada pode ser reservada com sucesso. Note que, se um protocolo OBS baseado em TAG ou IBT for usado, não existe maneira do segundo pacote de controle saber que a largura de banda será liberada antes da segunda rajada chegar (caso 1), ou que o comprimento da segunda rajada é pequeno o suficiente (caso 2).

O protocolo JET pode aproveitar os benefícios de FDLs que por ventura estejam disponíveis num nó intermediário, utilizando-os para atrasar rajadas bloqueadas até que a banda esteja disponível. Mesmo assim, é importante ressaltar que FDLs não são obrigatórios nesse protocolo.

Como mencionado anteriormente, ao tirar vantagem da informação sobre a duração de cada reserva, o uso da reserva atrasada (DR) pode aumentar a eficácia da utilização da largura de banda através do agendamento. Além disso, se o atraso de controle for relativamente grande em relação a duração média de uma rajada, então com o uso dos mesmos FDLs, o protocolo JET tem uma melhor performance (por exemplo, uma menor probabilidade de

descartar rajadas) que a comutação óptica de pacotes ou outros protocolos OBS que não possuem tempo de *offset*. Isto acontece porque o JET pode utilizar a totalidade dos FDLs disponíveis com o propósito de resolver conflitos e os outros protocolos não, pois precisam usar alguns FDLs para atrasar a rajada durante o processamento do cabeçalho ou pacote de controle.

4.3.2 – Aplicação do OBS na Internet Óptica

O conceito de Internet Óptica é que roteadores IP são interconectados diretamente a enlaces WDM. O protocolo IP roda diretamente sobre a camada WDM, que consiste de comutadores WDM e enlaces WDM. O OBS pode ser aplicado nesta visão de Internet Óptica da seguinte modo. Um pacote de controle pode ser processado por todos os nós intermediários que rodam IP para configurar um comutador WDM e reservar largura de banda em um canal de comprimento de onda, para que a rajada correspondente (por exemplo, vários pacotes IP) passe direto pelos comutadores WDM nos nós intermediários. Para reduzir o *overhead* envolvido no encaminhamento IP (na camada 3), os pacotes de controle correspondentes a múltiplas rajadas de pacotes IP correspondentes a um mesmo fluxo IP podem ser comutados por rótulo (encaminhados na camada 2) como em MPLS (ou GMPLS), fazendo com que os primeiros pacotes de controle configurem um LSP para os seguintes. Note que, se for usado JET, cada um dos pacotes de controle subsequentes ainda precisarão carregar informação de controle como o tempo de *offset* e a duração da reserva, além do rótulo. Tal enfoque pode ser chamado de OBS rotulado (*labeled OBS [LOBS]*), e é especialmente útil para *multicasting* de tráfego IP em rajadas na camada WDM.

Para tornar-se ainda mais adequado a utilização na Internet óptica, é importante que o OBS possa oferecer baixa probabilidade de descarte de rajadas para tráfego de alta prioridade e latência fim-a-fim limitada para tráfego sensível a atrasos (tempo real). Para resolver estes problemas são sugeridos a comutação óptica de rajadas com prioridade (*prioritized OBS*) e o atraso de pré-transmissão (*pre-transmission delay*), respectivamente [7].

Conclusão

O principal objetivo deste trabalho foi apresentar estratégias que permitam que o tráfego IP seja transportado de forma mais eficiente em redes ópticas. Para isso, foi feita uma apresentação das tecnologias de redes ópticas existentes. Entre as primeiras redes ópticas estão as redes SONET/SDH, que formam ainda hoje a infra-estrutura de telecomunicações utilizada no mundo. Elas foram projetadas originalmente para transportar chamadas de voz e linhas dedicadas e já não são mais adequadas para continuarem a ser utilizadas. A necessidade de transportar este crescente tráfego de dados, aliado a necessidade de fazê-lo a um custo menor, levaram à situação em que os operadores precisavam de uma solução que aumentasse a capacidade de suas redes, com uma melhor relação custo-benefício. A solução surgiu na forma da tecnologia WDM.

Primeiro, foi utilizada para aumentar a capacidade dos enlaces ponto-a-ponto. Depois, o surgimento de dispositivos como os *crossconnects* ópticos, com capacidade de roteamento baseado em comprimento de onda, permitiu que a camada WDM ofereça serviços de caminhos ópticos para as camadas superiores.

No entanto, os benefícios proporcionados pelas redes WDM ainda não são explorados de forma eficiente pelas redes utilizadas hoje em dia. A arquitetura das redes de dados atuais típicas possui quatro camadas: IP, ATM, SONET/SDH e WDM. Esse enfoque torna a rede cara, devido a existência de várias camadas, e pouco escalável, já que uma única camada pode limitar a escalabilidade da rede.

Como foi visto neste trabalho, o GMPLS apresenta-se como uma excelente solução no gerenciamento das redes heterogêneas atuais. E pode ser utilizado de forma a permitir uma transição suave entre o modelo de redes atual, com várias camadas separadas, para um modelo integrado onde todos os elementos de rede têm informações totais sobre todos os outros elementos de rede. O GMPLS tornará mais fácil a concretização da visão de uma Internet Óptica, onde roteadores IP serão interconectados diretamente por enlaces WDM, reduzindo o *overhead* de controle introduzido pela camada ATM (devido ao tamanho de suas células) assim como a necessidade de protocolos de sinalização complexos, e eliminando a necessidade de utilização de dispendiosos comutadores SONET/SDH. Nesta Internet Óptica, o protocolo IP roda diretamente sobre a camada WDM, que consiste de comutadores WDM e enlaces WDM. O grande benefício proporcionado pela camada WDM com o oferecimento de caminhos ópticos, é que grande parte do tráfego pode ser comutado no domínio óptico,

reduzindo a quantidade de dispendiosos roteadores eletrônicos de alta velocidade na camada IP.

Outra estratégia evolutiva para tráfego IP sobre redes ópticas WDM mostrada neste trabalho foi a comutação óptica de rajadas (OBS). Esta técnica tenta explorar o fato de que o tráfego IP tende a ser formado por rajadas. O protocolo apresentado, o JET, mostra-se bastante eficiente no aproveitamento da largura de banda proporcionada pela camada WDM, e pode ser modificado para garantir qualidade de serviço, suportando tráfego de alta prioridade e aplicações de tempo real.

Sugestões para Futuros Trabalhos

Este trabalho abordou duas estratégias para tráfego IP sobre redes ópticas WDM. Uma continuação natural seria o detalhamento dos diversos protocolos que compõem o GMPLS, principalmente porque estes protocolos ainda estão em fase de padronização e vários mecanismos específicos ainda não estão bem definidos.

Outro assunto importante que pode ser abordado mais detalhadamente são as técnicas de comutação. Há uma grande discussão sobre qual a técnica de comutação será dominante nas redes ópticas do futuro. A comutação óptica de pacotes, de circuitos e de rajadas estão disputando a preferência, cada qual com obstáculos tecnológicos específicos a serem superados.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Ramaswami e K.N. Sivarajan, “Optical Networks: a Practical Perspective”, *Morgan Kaumann Publishers*, ISBN 1-55860-445-6, San Francisco, 1998.
- [2] C. Murthy e M. Gurusamy, “WDM Optical Networks: Concepts, Designs and Algorithms,” *Prentice Hall*, ISBN 0-13-060637-5, 2002.
- [3] Krishna M. Sivalingam e Suresh Subramaniam, “Optical WDM Networks: Principles and Practice,” *Kluwer Academic Publishers*, ISBN 0-7923-7825-3, Norwell, USA, 2000.
- [4] E. Manie *et al.*, “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture,” Internet Draft, draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-02.txt, IETF, Março de 2002, *work in progress*.
- [5] “IEC Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS),” *Web Pro Forum Tutorial*, International Engineering Consortium, 2002. www.iec.com
- [6] A. Banerjee, J. Drake, J.P. Lang, B. Turner, K. Kompella e Y. Rekhter, “Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Routing and Management Enhancements,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 144-150, Janeiro de 2001.
- [7] C. Qiao e M. Yoo, “Choices, Features and Issues in Optical Burst Switching,” *Optical Networks Magazine*, vol. 1, no. 2, pp.36-44, Abril de 2000.